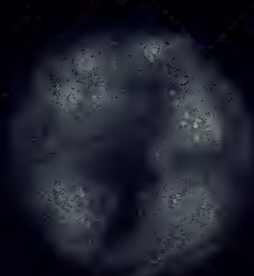

UNIVERSITY OF TORONTO
3 1761 01079792 6

LE SOLEIL

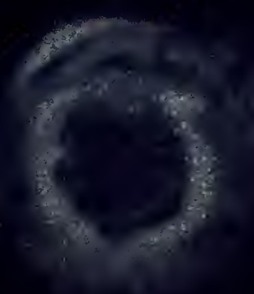
PARIS. — IMPRIMERIE DE GAUTHIER-VILLARS,
Quai des Augustins, 55.


Le Soleil
Pl. K
1
2
3
5
6
7
8
9

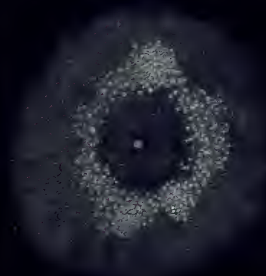
1



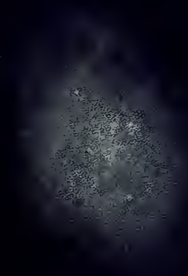
2



3



4



5



LE

SOLEIL

PAR

LE P. A. SECCHI S. J.

Directeur de l'Observatoire du Collège Romain,
Correspondant de l'Institut de France.

DEUXIÈME ÉDITION, REVUE ET AUGMENTÉE.

SECONDE PARTIE.



PARIS,
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,
Quai des Augustins, 55.

1877

TABLE DES MATIÈRES.

SECONDE PARTIE.

STRUCTURE DU SOLEIL (suite). — ACTIVITÉ EXTÉRIEURE.

LIVRE V.

LES PROTUBÉRANCES SOLAIRES.

CHAPITRE PREMIER. — INTRODUCTION.

CHAPITRE II. — CLASSIFICATION DES PROTUBÉRANCES.

CHAPITRE III. — ÉRUPTIONS SOLAIRES.

CHAPITRE IV. — ANALYSE SPECTRALE DES PROTUBÉRANCES EN DEHORS DES ÉCLIPSES.

CHAPITRE V. — DISTRIBUTION DES PROTUBÉRANCES.

CHAPITRE VI. — RELATIONS QUI EXISTENT ENTRE LES TACHES, LES PROTUBÉRANCES ET LE DIAMÈTRE SOLAIRE.

LIVRE VI.

TEMPÉRATURE DU SOLEIL.

CHAPITRE PREMIER. — ÉVALUATION DE LA TEMPÉRATURE DU SOLEIL.

CHAPITRE II. — ORIGINE ET CONSERVATION DE LA CHALEUR SOLAIRE.

CHAPITRE III. — DE QUELQUES PHÉNOMÈNES QUI DÉPENDENT DE LA CONSTITUTION PHYSIQUE DU SOLEIL.

LIVRE VII.

ACTIVITÉ EXTÉRIEURE DU SOLEIL.

CHAPITRE PREMIER. — DES RADIATIONS.

CHAPITRE II. — GRANDEUR DU SYSTÈME SOLAIRE.

CHAPITRE III. — LE SOLEIL CENTRE DE FORCE ; GRAVITATION.

CHAPITRE IV. — LES COMÈTES ET LES ÉTOILES FILANTES.

LIVRE VIII.

LES SOLEILS OU LES ÉTOILES.

CHAPITRE UNIQUE.

PLANCHES.

LE SOLEIL.

SECONDE PARTIE.

STRUCTURE DU SOLEIL (SUITE). — ACTIVITÉ EXTÉRIEURE.

LIVRE V.

LES PROTUBÉRANCES SOLAIRES.

CHAPITRE PREMIER.

PREMIÈRES RECHERCHES.

INTRODUCTION.

L'éclipse de 1868 sera une date mémorable dans l'histoire de l'Astronomie, car c'est alors que M. Janssen apprit aux savants à étudier en tous temps les protubérances, sans être obligé d'attendre les époques si rares où la nature se plaît à nous les montrer en éclipsant pour un instant la brillante lumière qui nous empêche de les voir. Depuis lors, le spectroscope est devenu un instrument indispensable aux astronomes ; c'est grâce à lui qu'ils peuvent observer tous les jours ces produits de l'activité solaire qui se dérobent ordinairement à nos regards. On s'est livré à cette étude avec une

ardeur incomparable, et en quelques années on a obtenu des résultats extrêmement intéressants; les nouvelles découvertes ont comblé de nombreuses lacunes dans les différentes branches de la Physique solaire, et projeté une éclatante lumière sur une multitude de questions qui, sans ces travaux, seraient restées à jamais enveloppées de la plus profonde obscurité.

Le jour même où l'on apprenait en Europe la découverte de M. Janssen, un autre savant justement célèbre, M. Lockyer, arrivait de son côté au même résultat. Une coïncidence aussi frappante nous montre que la science était préparée à cette grande découverte; mais il est incontestable que l'observation de l'éclipse totale a singulièrement aidé à l'intelligence de ces phénomènes qui, sans elle, auraient peut-être été pendant longtemps mal compris et mal interprétés. L'histoire de la science ne nous donne que peu d'exemples d'un succès aussi rapide et aussi complet, et ce succès est d'autant plus remarquable qu'il s'agissait d'un travail très-difficile et que les observateurs étaient en petit nombre; aussi nous ne craignons pas de dire que la postérité rendra justice au zèle et à l'habileté des savants nos contemporains.

Nous nous proposons de faire connaître ici les méthodes d'observation et les résultats obtenus; nous le ferons aussi brièvement que le permettront l'importance du sujet et l'étendue des matériaux; mais, avant de commencer, nous devons avertir le lecteur qu'il est très-difficile de dire ce qui appartient à chaque savant en particulier. Très-souvent, les mêmes observations et les mêmes découvertes ont été faites simultanément dans des pays très-éloignés les uns des autres; quelquefois, bien que faites à des jours différents, elles ont cependant été indépendantes, de sorte que plusieurs observateurs en partagent la gloire. Il faut dire de ces travaux ce qu'on dit d'une victoire remportée par une troupe de braves :

elle est due au mérite de tous les soldats et à celui de chacun d'eux en particulier; l'honneur consiste à avoir son nom inscrit sur les rôles de cette armée glorieuse. Mais personne ne songe à revendiquer la gloire de ce qu'il a fait personnellement pour contribuer au succès commun : ce seraient des rivalités puériles et sans fruit.

Janssen, Lockyer, Herschel, Zöllner, Huggins ont ouvert la brèche; à leur suite sont venus Respighi, Tacchini, Lorenzoni, Rayet, Young, etc. Tels sont les noms que nous rencontrerons souvent dans cet exposé. Nous avons cherché, par tous les moyens possibles, à nous mettre au courant de tous les travaux qui ont été exécutés par ces savants et laborieux observateurs; mais, tout en cherchant à rendre à chacun ce qui lui est dû, nous puiserons dans notre propre expérience les résultats que nous avons pu constater. S'il nous arrive d'apprécier le mérite de chacun avec moins de justice que nous n'aurions désiré le faire, nous demandons qu'on l'attribue à l'extrême difficulté d'y réussir et non à quelque sentiment ressemblant plus ou moins à la malveillance.

D'ailleurs, le premier pas était le plus difficile, et la véritable gloire revient à la première découverte. A partir de ce moment, il suffisait d'avoir de la patience et de l'adresse pour réussir, et les découvertes devaient nécessairement se multiplier. C'est ainsi que nous avons pu entrer un des premiers dans cette voie; nous avons répété les observations de M. Janssen le jour même où le journal de M. l'abbé Moigno nous les fit connaître, et depuis lors nous n'avons pas cessé de nous en occuper. Le lecteur comprendra donc que nous parlions de préférence de ce que nous avons vu : en agissant ainsi nous ne voulons pas revendiquer pour nous les travaux des autres, mais nous décrirons les phénomènes avec plus d'assurance et de conviction.

§ I. — *Observations faites avec une fente étroite.*

On peut, suivant le but qu'on se propose, employer différentes méthodes pour l'observation des protubérances solaires. Chacune de ces méthodes exige cependant de l'adresse, un spectroscope possédant un mécanisme qui permette de le tourner à volonté dans les différents angles de position, de sorte qu'il puisse occuper toutes les positions autour de l'axe de la lunette, enfin une lunette à laquelle on puisse imprimer des mouvements lents et précis. Cette lunette doit être mue par un mouvement d'horlogerie, ou, du moins, elle doit être adaptée à une monture parallactique avec le mécanisme nécessaire pour produire des mouvements lents. Il faut, en effet, maintenir pendant quelque temps le bord de l'image solaire sur la fente du spectroscope, dont la largeur est au plus de quelques dixièmes de millimètre, et suivre le mouvement de l'astre pendant la durée de l'observation. Pour certaines recherches plus délicates, l'horloge motrice ne donne même pas une précision suffisante, et il faut savoir y suppléer soi-même.

Nous avons déjà parlé des spectroscopes [1], et nous ne reviendrons pas sur ce que nous avons déjà dit; mais nous devons ajouter ici quelques détails qui sont utiles pour le nouveau genre d'observations dont nous avons à parler.

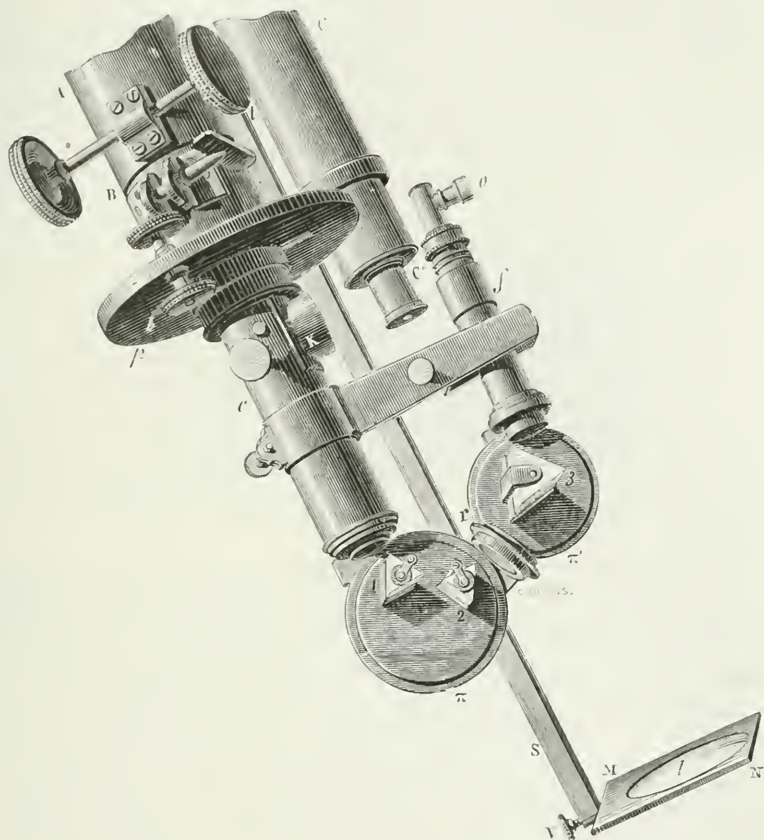
La *fig.* 151 représente la disposition de notre appareil; il se compose d'une grande lunette équatoriale ayant 25 centimètres d'ouverture et $4^{m},40$ de longueur focale. En AB est représenté le porte-oculaire auquel est adapté le spectro-

---

[1] Tome I, pages 220-234.

scope. *p* est le cercle de position au moyen duquel le spectroscope est mis en mouvement par le bouton *b* engrenant avec une roue dentée placée à l'intérieur. π, π' sont les pla-

Fig. 151



tines portant les prismes; CC′ est le chercheur de la grande lunette; MN un écran en carton blanc sur lequel se projette l'image du Soleil formée par le chercheur, afin de reconnaître plus facilement les points que l'on observe; *fo* lunette analysatrice du spectroscope ayant un oculaire diagonal *o* pour

faciliter le travail. Dans le tube *c* se trouve le collimateur avec un prisme à vision directe.

Dans les observations que l'on fait d'ordinaire avec le spectroscope, il s'agit simplement de recevoir l'ensemble des rayons que nous envoie une source de lumière ; ici, au contraire, on se propose d'examiner en particulier certains points du disque solaire. Pour cela, il faut d'abord projeter l'image du Soleil sur la plaque dans laquelle est pratiquée la fente du collimateur ; cette plaque doit donc être au foyer principal de l'objectif, afin que l'image s'y forme avec netteté et précision. On s'assure que ce résultat est obtenu en regardant l'image avec une loupe à travers une ouverture latérale K, en protégeant l'œil avec un verre légèrement coloré. Nous conseillons beaucoup de pratiquer dans le tube cette ouverture latérale, ou d'employer un moyen quelconque pour rendre la fente commodément visible : les débutants auront ainsi plus de facilité pour la mise au point, et l'on pourra voir directement quelle est la position de l'image par rapport à la fente.

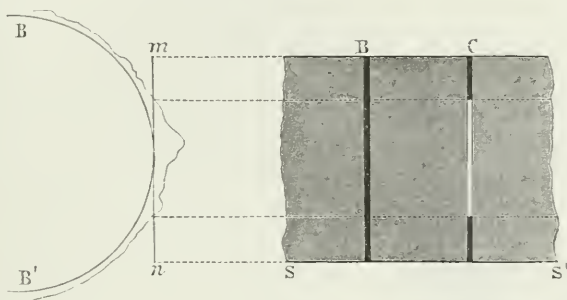
La mise au point étant terminée et la fente étant convenablement rétrécie, on met au point l'oculaire de la petite lunette du spectroscope, de manière à voir nettement toutes les raies de Fraunhofer et surtout la raie C de l'hydrogène, après quoi on ne touchera plus à cette partie de l'instrument. Comme le spectre est, en général, assez vif, on pourra protéger l'œil avec un verre légèrement coloré en rouge rubis, comme on en trouve facilement dans le commerce : ce verre suffira pour que l'œil ne soit pas ébloui, et, comme il n'arrête pas tous les rayons rouges, on pourra distinguer nettement la raie C.

L'appareil étant ainsi disposé, on le promènera lentement sur le disque solaire, jusqu'à ce que la fente vienne à tomber

sur le bord, de manière à y être parfaitement tangente. Alors on verra tout à coup la raie C devenir brillante : c'est que la chromosphère se projettera sur la fente et que sa lumière remplira le champ de la lunette analysatrice. Ce résultat est représenté dans la *fig.* 152. BB' est le bord du disque solaire au-dessus duquel s'élève la chromosphère; *mn* est la position de la fente, SS' le spectre dans lequel la raie C est renversée, tandis que la raie B est noire.

Pour voir nettement les protubérances, il faut que l'image

Fig. 152.

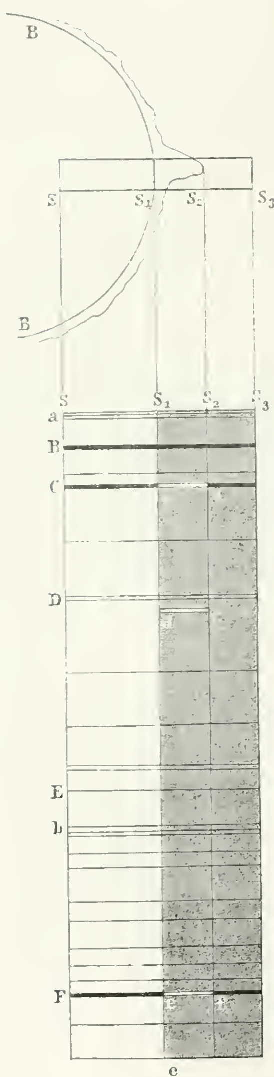


du Soleil se fasse avec la plus grande précision dans le plan de la fente. Pour y arriver, on dispose la fente perpendiculairement au bord du disque; on voit alors dans le champ deux parties bien distinctes, l'une qui est vivement éclairée par les rayons directs du Soleil, l'autre éclairée par une lumière beaucoup plus faible venant de l'atmosphère environnante : c'est ce que représente la *fig.* 153. On tourne alors le bouton B de la grande lunette, qui sert à régler la distance de la fente à l'objectif, jusqu'à ce qu'on voie nette et bien tranchée la ligne $S_1\,e$, qui sépare le champ en deux parties diversement éclairées.

Si l'on tombe sur une protubérance, on verra immédiatement jaillir, en dehors du Soleil, trois raies brillantes : l'une

dans le rouge sur le prolongement de C, la seconde tout près de D, la troisième sur le prolongement de F; peut-être même en verra-t-on une quatrième près de G. S'il n'y a pas de protubérances, ces lignes existeront néanmoins; mais elles seront très-courtes et, par conséquent, difficiles à reconnaître. S'il y a sur le bord du Soleil quelque facule ou quelque tache, en dirigeant la fente vers l'endroit où elle se trouve et en la maintenant toujours normale au bord du disque, ce qu'on fera en tournant convenablement le spectroscope en *position* au moyen du pignon *b*, on trouvera bientôt dans le voisinage les raies que nous venons d'indiquer et qui caractérisent les protubérances.

Fig. 153.

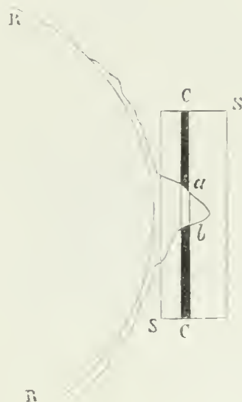


Si, après quelques essais, on ne réussissait pas, on recommencerait l'opération en disposant la fente parallèlement au bord, suivant le procédé que nous avons indiqué plus haut. On pourrait, avec avantage, suivre une marche inverse, c'est-à-dire mettre la fente en dehors du disque solaire et l'en approcher lentement; lorsqu'on verra s'accroître d'une manière considérable l'éclat de la lumière, on regardera attentivement la raie C; au moment où la lumière du disque commencera à paraître comme

une pluie de rayons brillants, à cause de l'agitation du bord, on verra tout à coup la raie C devenir lumineuse et se détacher avec une grande vivacité sur le reste du spectre (*fig.* 154). Si cette raie apparaît à quelque distance du bord, elle appartient à une protubérance; elle provient simplement de la chromosphère, si elle n'apparaît que dans le voisinage immédiat du Soleil.

Il faut rappeler deux choses à ceux qui débutent dans ces

Fig. 154.



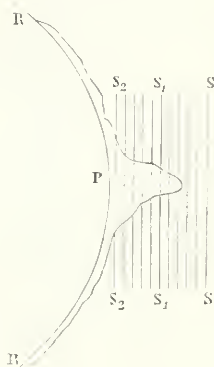
observations : 1° la chromosphère est très-basse, et par suite il est difficile de saisir la raie brillante qui la fait reconnaître; mais, lorsqu'on l'aura vue une fois, on la retrouvera facilement; 2° lorsque l'air est calme, la difficulté est beaucoup moins grande; si l'atmosphère est fortement agitée, on voit apparaître la raie brillante au milieu de la pluie de rayons qui la précède ordinairement. Comme la chromosphère enveloppe le Soleil de toutes parts, on doit l'apercevoir sur tous les points de son contour.

Lorsqu'on a réussi à voir la raie C renversée, il est facile de trouver les protubérances en faisant tourner le spectro-

scope autour de sa roue de position à l'aide du bouton *b* et en le mettant successivement en contact avec les différents points de la circonférence, surtout dans la région des taches. Il faut cependant un peu d'adresse et d'habitude pour exécuter ces mouvements. Dans les époques où les protubérances sont rares, comme en 1875, il faut quelquefois parcourir des arcs très-grands avant d'en trouver une, de sorte que le travail alors est un peu pénible.

Lorsqu'on a rencontré une protubérance, on peut relever

Fig. 155.



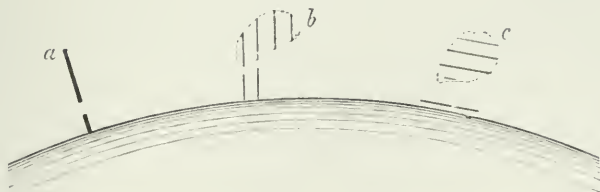
sa forme de plusieurs manières; la première méthode est celle des sections successives, parallèlement ou perpendiculairement au bord.

Soit RPR (*fig.* 155) le bord du disque solaire; si l'on donne successivement à la fente les positions SS, S_1S_1, S_2S_2, on verra varier la longueur de la ligne brillante dans le champ de la lunette analysatrice, et l'on pourra ainsi apprécier la forme de la protubérance. Si c'est un nuage isolé, on verra les raies disparaître à une certaine distance, puis reparaître de nouveau, comme dans la *fig.* 156.

Il n'est pas difficile de se rendre compte de ces appa-

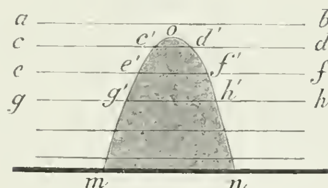
rences. La fente tombant sur la protubérance *mon* (*fig.* 157), la ligne *gh*, C de l'hydrogène, sera éclairée seulement dans

Fig. 156.



la région *g'h'*, la ligne *ef* ne sera brillante que sur la lon-

Fig. 157.



gueur *e'f'*, et ainsi de suite, jusqu'à la ligne *ab* qui ne sera nullement éclairée, parce qu'elle tombe en dehors.

§ II. — *Premiers résultats des observations.*

Cette méthode est pénible, parce qu'elle demande une grande attention ; elle permet cependant de résoudre un grand nombre de problèmes et d'obtenir des résultats très-importants relativement aux protubérances et à la chromosphère.

1° Supposons la fente perpendiculaire au bord et divisée en deux parties égales par le contour du disque. Quel que soit le point que l'on observe, on aperçoit toujours un spectre

composé de deux zones inégalement éclairées (*fig.* 153 et *Pl. II, fig.* 1), mais possédant toutes les deux les raies caractéristiques du spectre solaire; la plus brillante appartient au Soleil, l'autre à l'air atmosphérique éclairé par la lumière de cet astre. Près de la ligne de séparation des deux zones, un peu en dehors, les raies C et F brillent d'un vif éclat. De plus, dans le jaune, auprès du point D, du côté du vert, on voit briller une raie jaune. Enfin on aperçoit dans le voisinage de la raie G une autre trace brillante que l'on a nommée *h*.

A l'exception de celle qui correspond au jaune, toutes les raies que nous venons de signaler appartiennent à l'hydrogène : d'où il suit que ce gaz forme une couche générale et continue autour du Soleil.

2° Cette couche a une épaisseur de 10 à 15 secondes, mais elle est très-irrégulière; on peut le constater en disposant la fente perpendiculairement au bord et en mesurant l'étendue des portions brillantes. Cependant on remarque bien souvent que la ligne noire, C par exemple, disparaît d'une manière complète sans donner lieu à une ligne brillante; c'est ce qui arrive surtout auprès des facules et des taches. Ce fait démontre que l'hydrogène existe bien au delà des régions où il produit le renversement des raies; mais il y est en quantité suffisante pour neutraliser seulement la ligne noire sans pouvoir la rendre brillante. En disposant la fente tangentiellement au bord, on voit les raies acquérir une longueur égale à la largeur du spectre et devenir très-vives.

3° En plusieurs points du contour solaire, on voit des lignes brillantes acquérir et même dépasser notablement la longueur qui correspond à 15 secondes; elles se présentent quelquefois comme des fragments isolés du bord, ainsi qu'on le voit dans la *fig.* 156, en *a* et en *b*, où la fente est perpendiculaire

au bord, ou comme en *c*, où elle lui est parallèle. On voit par cet exemple que, d'après la forme et la disposition des raies, on peut tracer la forme des protubérances en déplaçant convenablement le spectroscope.

On peut donc, par ce moyen, étudier les protubérances avec la plus grande facilité, même en dehors des éclipses, signaler leur présence, déterminer leur forme et les dessiner avec autant de facilité que si elles étaient visibles dans toute leur étendue.

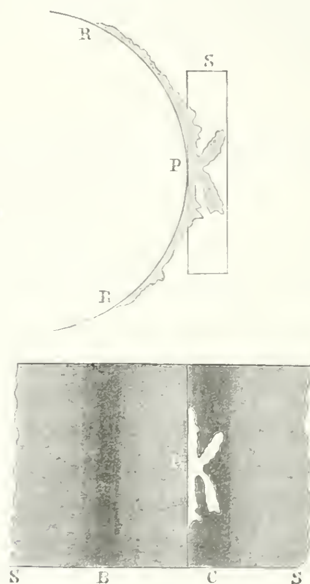
§ III. — *Observations faites avec une fente large.*

Cette méthode était cependant très-pénible, et, si nous en avons profité, ce n'a été qu'au prix de beaucoup de fatigues; mais, lorsqu'on observe tangentiellement au bord solaire, si l'on ouvre lentement la fente jusqu'à lui donner une largeur de 3 ou 4 dixièmes de millimètre, ou même davantage suivant les cas, on verra la ligne C devenir plus large et irrégulière sur l'un de ses côtés; on pourra alors voir directement le contour entier de la protubérance ou du moins la plus grande partie. Lorsqu'on ouvre ainsi la fente, les raies fines disparaissent complétement; la raie C s'élargit et cesse d'être nettement terminée sur ses bords; mais en même temps le contour de la protubérance se dessine avec netteté, comme on le voit dans la *fig.* 158. Si alors on ne voit pas assez nettement la forme de la protubérance, il faudra modifier la mise au point de la grande lunette, et l'on ne tardera pas à avoir une image nette et bien tranchée. La flamme se détache ainsi sur le fond sombre de la raie diffuse C, elle brille d'un merveilleux éclat aux yeux de l'observateur.

Telle est la nouvelle méthode que nous employons pour

observer en plein jour les protubérances du Soleil; cette légère modification apportée au premier procédé rend les observations plus faciles et nous permet d'obtenir en moins de temps des résultats plus nombreux. Elle a été imaginée à la fois par le capitaine Herschel, par MM. Huggins et Zöllner; nous pouvons dire qu'elle a suffi à transformer l'étude des

Fig. 158.



protubérances : elle l'a rendue facile et attrayante, de pénible qu'elle était auparavant.

Avant qu'on eût imaginé ce procédé si simple, M. Huggins avait essayé de voir directement les images des protubérances en adaptant à l'oculaire des milieux colorés; mais il n'avait pas réussi. MM. Zöllner et Young avaient essayé des fentes oscillantes et d'autres mécanismes, mais sans aucun succès : il a suffi d'élargir un peu la fente pour satisfaire complétement aux besoins de la science.

Nous avons parlé d'un verre rouge qu'on peut placer devant l'oculaire du spectroscope pour faciliter l'observation des protubérances. Ce verre est très-utile : il absorbe la lumière diffuse et ménage la vue de l'observateur. Sans doute, il fait pâlir les protubérances un peu faibles, mais il rend en somme des services réels dans une longue série d'observations. Tout ce que nous venons de dire ne s'applique, bien entendu, qu'au cas où l'on se propose d'étudier l'image rouge des protubérances. Si l'on veut examiner la raie F ou quelque autre ligne colorée, il faut renoncer au verre rouge ; mais alors il devient nécessaire d'affaiblir autant que possible la lumière atmosphérique et d'augmenter la dispersion en multipliant le nombre des prismes, ou en faisant revenir le rayon à travers les prismes qu'il a déjà traversés une première fois. M. Young a réussi à photographier l'image violette des protubérances correspondant aux rayons voisins de H ; il employait pour cela un spectroscope à treize prismes, et une petite chambre obscure appliquée à la lunette du spectroscope.

Avec le spectroscope ordinaire, on peut étudier assez bien les taches, surtout en grossissant avec un oculaire ou avec l'objectif d'un microscope l'image produite au foyer de la grande lunette et projetée sur la fente. Cependant elles sont en général déformées par la dispersion, qui les allonge énor-

Fig. 159.



mément (*fig.* 159) ; mais, si l'on place un second prisme à 20 ou 25 centimètres de la fente, ou bien en avant de l'objectif de la grande lunette, comme nous l'avons expliqué précédemment (t. Ier, p. 233), on parvient à les voir aussi bien qu'avec un verre coloré. Ce procédé est utile, surtout

lorsqu'il s'agit de reconnaître les positions relatives des taches, des facules et des protubérances. Dans ce cas, on peut aussi évaluer la hauteur des protubérances par la distance qui existe entre le bord du Soleil et le point où se manifestent les raies renversées de l'hydrogène ; on peut employer les raies spectrales elles-mêmes pour mesurer cette distance. Enfin on peut, par ce moyen, constater que les raies du sodium, du calcium et du fer se dilatent et deviennent nébuleuses sur les taches. Lorsqu'il y a une violente éruption, on voit apparaître les lignes brillantes qui caractérisent l'hydrogène même dans l'intérieur des taches.

Ce qui serait à désirer maintenant pour faciliter encore davantage ces recherches, c'est la découverte d'un milieu parfaitement monochromatique pour les raies de l'hydrogène. On verrait alors l'image de ces flammes rouges comme on voit celles des taches. Ce milieu peut-il être trouvé? Nous engageons les physiciens à diriger leurs recherches de ce côté.

Les détails dans lesquels nous sommes entré paraîtront sans doute minutieux, mais ils ne seront pas inutiles pour les amateurs. Il arrive souvent que, faute d'instructions détaillées, on perd au début beaucoup de temps, quelquefois même on se décourage en voyant qu'on n'arrive à aucun résultat. C'est ce qui nous a engagé à donner tous ces détails pratiques, et nous agirons de même dans la suite.

§ IV. — *Réflexions théoriques sur les instructions pratiques qui précèdent.*

Si l'on veut que rien n'arrête dans l'application pratique des instructions que nous venons de donner, il est nécessaire de comprendre les principes sur lesquels reposent tous ces

procédés : c'est pour cela que nous allons faire une petite excursion dans le domaine de la théorie optique du spectroscope.

L'instrument ainsi combiné s'appelle *téléspectroscope :* car il se compose d'un spectroscope combiné avec un télescope ou lunette astronomique. Dans cet appareil, il y a deux foyers bien distincts, et chacun doit être mis au point avec la plus grande précision : 1° la petite lunette analysatrice doit être mise au point sur les raies, la fente étant étroite; 2° la grande lunette doit être réglée de manière à produire sur le plan de la fente une image nette des bords du Soleil.

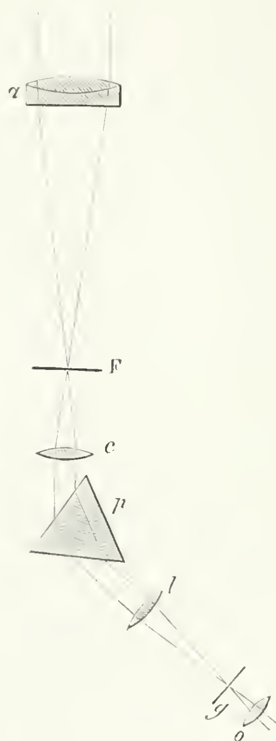
Il ne sera pas inutile d'entrer dans quelques détails sur la marche de la lumière dans le spectroscope. Nous supposerons, pour plus de simplicité, qu'il est composé d'un seul prisme.

Soit a la lentille objective de la grande lunette (*fig.* 160); les rayons se croisent au foyer principal F, et c'est là que doit se trouver la fente. De là, ils passent dans l'objectif c du collimateur qui les rend parallèles; puis ils traversent le prisme p, l'objectif l de la lunette analysatrice et vont enfin former une seconde image réelle g, qu'on examine avec l'oculaire o. Le grossissement G de tout ce système est représenté par la longueur focale F de la grande lunette divisée par la longueur focale du collimateur f, le quotient étant multiplié par le grossissement g de la petite lunette : $G = \frac{F}{f} g$. Dans notre instrument, $F = 4^m,30$, $f = 0^m,13$, $g = 5,5$; par conséquent, $G = \frac{4.30}{0,13} \times 5,5 = 182$.

La longueur du collimateur est ordinairement égale à la distance focale de la petite lunette; le grossissement est alors égal à celui qu'on obtiendrait en appliquant à la grande lunette l'oculaire de la petite. On voit donc que les instruments puissants auront l'avantage de donner avec plus de détails

l'image des protubérances. Sans doute on les verra avec une bonne lunette, quelles que soient ses dimensions, mais, pour cela comme pour l'observation des taches, la supériorité restera toujours aux instruments les plus puissants.

Fig. 160.



Il est bon de remarquer qu'il doit y avoir une certaine proportion entre les deux parties de l'appareil, ainsi que l'a démontré M. Lorenzoni : tous les appareils spectroscopiques ne peuvent pas également bien s'appliquer à toutes les lunettes.

On peut encore se demander comment le spectroscope possède cette merveilleuse propriété de faire voir les protu-

bérances en plein jour. On avait fait beaucoup de tentatives pour arriver à ce résultat; elles avaient toujours été vaines. On avait essayé de produire des éclipses artificielles, d'arrêter par des milieux absorbants la plus grande partie des rayons lumineux provenant du disque solaire, etc., etc.; tout avait été inutile. Le spectroscope seul a réussi. Quelle en est la raison?

Il est assez facile de répondre à cette question. Nous ne pouvons voir les objets célestes qu'à travers l'atmosphère qui nous entoure, et cette atmosphère, dans les environs du Soleil, est très-vivement éclairée par les rayons qui la traversent. La lumière des protubérances, étant extrêmement faible, ne peut agir sur l'organe de la vue qu'à la condition d'être isolée de toute autre lumière un peu vive. La photosphère brille d'un si vif éclat qu'on ne peut espérer de voir les protubérances qu'en se protégeant contre les radiations lumineuses qu'elle nous envoie. Les verres absorbants qu'on emploie communément pour observer le Soleil ne peuvent ici nous rendre aucun service, car, s'ils arrêtent assez de rayons pour nous rendre supportable la lumière éclatante de la photosphère, ils doivent rendre les protubérances absolument invisibles. Il faut donc recourir à un écran qui nous protége, non-seulement contre les radiations photosphériques, mais aussi contre la lumière que réfléchit l'atmosphère terrestre : tel est le double service que nous rend la Lune pendant les éclipses. Dans le spectroscope, l'écran, c'est la paroi opaque dans laquelle est pratiquée la fente; elle arrête bien les rayons qui viennent directement de la photosphère, mais elle n'empêche pas l'effet produit par l'illumination de l'air atmosphérique. Il s'agit donc de diminuer l'éclat de cette lumière, et c'est ce que font les prismes, grâce à la nature des rayons, sinon monochromatiques, du moins oligochroma-

tiques des protubérances. La fente reçoit en même temps les rayons rouges des protubérances et les rayons de toute nature qui sont réfléchis par l'air atmosphérique ; mais ces derniers sont étalés par le prisme en une bande très-longue et presque continue, ce qui affaiblit considérablement leur intensité, tandis que la lumière des protubérances subit une dispersion beaucoup moins grande ; elle donne naissance à un petit nombre de raies qui conservent tout leur éclat, et deviennent visibles parce qu'elles sont plus brillantes que la partie du spectre qui les entoure.

Le spectroscope fait pour les protubérances ce que font les lunettes pour les étoiles. Ces astres ne peuvent être observés à l'œil nu pendant le jour, mais on peut les apercevoir avec un bon télescope, tandis que les planètes sont absolument invisibles, même avec un instrument. C'est que les étoiles, n'ayant pas de diamètre apparent, sont pour nous comme des points lumineux ; leur image est également un point où se trouve concentrée toute la lumière qui tombe de l'astre sur l'objectif, tandis que le grossissement de la lunette étale sur une surface plus grande la lumière des planètes et celle qui nous vient de l'air atmosphérique. Telle est l'explication d'Arago pour la visibilité des étoiles, et il est facile de voir combien elle ressemble à la théorie que nous venons de donner pour expliquer l'action du spectroscope.

Cette théorie nous montre combien il est avantageux de multiplier les prismes afin d'augmenter la dispersion. On affaiblit ainsi l'intensité lumineuse du spectre atmosphérique, tandis que celle des raies protubérantielles n'est diminuée que faiblement par les réflexions et les absorptions que l'on ne saurait éviter dans les prismes. C'est pour cela qu'on a construit des appareils où la lumière traverse successivement six prismes, quelquefois douze et davantage. Il y a cependant

une limite au delà de laquelle les prismes nuiraient plus, en réfléchissant et en absorbant la lumière des protubérances, qu'ils ne serviraient en dispersant davantage celle de l'atmosphère.

La théorie explique encore un fait qui avait été remarqué dans la pratique des observations spectrales. Lorsque l'air est bien pur et le ciel parfaitement bleu, on peut ouvrir beaucoup la fente et voir ainsi une grande étendue des protubérances; mais, lorsque le ciel est brumeux et blanchâtre, la fente doit demeurer plus étroite. Lorsque l'atmosphère est remplie de ces cirrus formés d'aiguilles de glace qui donnent naissance aux halos, toute observation devient impossible, à cause de la lumière que ces petits cristaux diffusent en tous sens autour du Soleil; les brouillards formés de gouttelettes liquides présentent beaucoup moins d'inconvénients. Lorsque le ciel est pur, nous pouvons donner à la fente une ouverture de plus de 1 millimètre; lorsque le temps est voilé, nous devons la réduire à $\frac{1}{3}$ de millimètre; lorsqu'il y a des aiguilles de glace, il faut renoncer aux observations.

L'ouverture que nous employons habituellement correspond à une valeur angulaire de 24 à 30 secondes, ce qui fait sur le Soleil une hauteur de 17160 à 21450 kilomètres. Si la protubérance est plus grande, il faut l'observer *par tranches;* mais, ces tranches étant assez épaisses, on peut facilement se faire une idée de la configuration générale, et arriver à faire un dessin suffisamment exact. On peut quelquefois élargir la fente davantage lorsque la protubérance est très-vive, le spectroscope très-dispersif et l'air bien pur. Si la lunette ne grossit pas beaucoup, c'est-à-dire si l'image réelle produite au foyer de l'objectif est petite, on peut, avec une fente assez étroite, voir en entier la plupart des protubérances; mais alors on ne voit pas bien les détails de leurs formes, et l'on

s'expose à de grandes illusions dans l'appréciation de leur structure intérieure. Une lunette de 10 à 12 centimètres d'ouverture suffit, en général, lorsqu'on emploie un spectroscope composé d'un seul prisme à vision directe assez dispersif; mais alors il est difficile de bien étudier les détails, si ce n'est dans quelques circonstances exceptionnellement avantageuses.

En règle générale, si l'on veut réussir à coup sûr, il ne faut pas tellement ouvrir la fente que les raies C, B, etc., disparaissent complétement : il faut qu'elles soient diffuses, mais reconnaissables. Lorsque les protubérances sont très-vives, on peut employer une largeur plus considérable, de manière à faire disparaître complétement les raies dont nous venons de parler, mais il n'en faut venir là qu'après avoir fait plusieurs essais pour reconnaître quelle est la largeur qui donne l'image la plus nette. C'est surtout dans ces recherches qu'il est utile de pouvoir apprécier le grossissement du spectroscope.

Pour étudier les protubérances, on peut employer toutes les raies qui leur sont propres, C, D_3, F, h. La raie C est celle qui se prête le mieux à l'observation, parce qu'elle est plus vive et plus tranchée. Les autres sont moins brillantes; elles se projettent sur un fond plus lumineux ou dans des positions moins favorables pour l'observation. Nous verrons cependant que, pour certaines études, on peut se servir également bien de toutes les raies.

Quant au pouvoir grossissant qui convient le mieux, cela dépend de l'éclat lumineux de l'objet qu'on observe. S'il s'agit d'une masse faiblement illuminée, un grossissement considérable la ferait disparaître, tandis qu'un instrument moins puissant permettra de la voir distinctement et d'en apprécier la structure intérieure. Il en est des protubérances solaires comme des taches et des zones qu'on observe dans les pla-

nètes, pour lesquelles il est souvent préférable de ne pas employer les plus forts grossissements. Nous nous contentons en général de grossir 180 fois; il est rare que nous allions jusqu'à 300 ou 400, car ce qu'on gagne en surface on le perd en éclat et en netteté.

En augmentant le nombre des prismes, on diminue la lumière atmosphérique sans augmenter les dimensions de l'image : aussi ce procédé est-il préférable à l'emploi des lunettes à long foyer qui donnent une image plus grande et diminuent à la fois l'intensité lumineuse de l'atmosphère et celle des protubérances.

On peut se demander quels sont les spectroscopes les plus convenables pour ces observations : vaut-il mieux employer les prismes à vision directe ou les prismes ordinaires? Nous croyons que les prismes angulaires sont préférables, surtout lorsque l'appareil est disposé, comme le nôtre, de manière à transporter l'oculaire tout près de la fente, car l'observateur peut alors très-facilement, et sans se déranger, amener le bord du disque solaire sur la fente. De plus, les spectroscopes à vision directe augmentent beaucoup la longueur de la lunette, ce qui est un grave inconvénient lorsque le dôme de l'observatoire n'est pas très-grand. Enfin, si les prismes sont doués d'un mouvement automatique, on peut examiner le spectre tout entier avec une grande facilité, jusqu'au violet extrême : il n'en est pas de même avec le spectroscope à vision directe; en supposant qu'il contienne deux prismes composés, on peut à peine aller au delà de la raie F [1].

---

[1] Lorsque la *fig.* 151 a été dessinée, notre appareil ne possédait pas encore les pièces destinées à produire le mouvement automatique. Depuis lors, nous les avons fait construire et nous les avons adaptées à un système de cinq prismes à double trajet dont nous sommes enchanté. (*Voir* t. I, p. 228, *fig.* 86.)

Quant à l'intensité lumineuse, il n'y a pas une grande différence; il est bien vrai que dans les prismes à vision directe les réflexions sont moins nombreuses, mais cet avantage est compensé par une absorption plus énergique due à la grande épaisseur du verre. Du reste, le jugement que l'on porte dépend beaucoup de la pratique et de l'habitude : il arrive quelquefois qu'un instrument paraît d'abord peu avantageux; puis on le trouve excellent lorsqu'on s'en est servi pendant quelque temps. Le spectroscope construit avec les réseaux de M. Rutherfurd nous réussit à merveille et nous fait voir les détails avec la plus grande netteté; mais il est à craindre que le métal ne vienne à s'oxyder.

§ V. — *De la mesure des protubérances.*

Pour déterminer les dimensions d'une protubérance, on mesure sa largeur et sa hauteur. Le cas le plus simple est celui où la protubérance est assez petite pour être entièrement visible dans le champ de la lunette, sa hauteur étant moindre que la largeur de la fente et sa base ne dépassant point la longueur; il n'y a alors aucune difficulté, car il suffit d'employer le micromètre qui se trouve à l'oculaire du spectroscope. Il n'en est pas de même lorsque les dimensions sont plus considérables et que la protubérance dépasse l'étendue de la fente : la mesure présente alors une difficulté sérieuse.

Pour mesurer la base, on dispose la fente de manière qu'elle soit successivement tangente à ses deux extrémités, et l'on détermine cette dimension en degrés du périmètre du bord solaire par l'angle dont il a fallu tourner le spectroscope; on peut facilement obtenir cet angle avec une assez

grande approximation. De là, il est facile de passer à la vraie grandeur : 1 degré sur le contour du disque solaire correspond à un angle géocentrique de 16″,79, ce qui suppose une longueur de 12004 kilomètres, ou bien, en nombre rond, un diamètre terrestre.

Pour la hauteur, lorsqu'on garde la fente du collimateur parallèle au bord, il faut la porter successivement sur les différentes sections et compter combien de fois la fente est contenue dans la hauteur de la protubérance, ce qui expose à bien des incertitudes; mais, lorsqu'on dispose la fente perpendiculairement au bord, toute incertitude disparaît, car il suffit de mesurer la longueur de la plus grande des lignes brillantes qui traversent le spectre; ce moyen ne réussit cependant que pour les protubérances dont la hauteur ne dépasse pas la largeur du spectre. D'ailleurs cette méthode est longue et laborieuse; si on l'employait constamment, il en résulterait une perte de temps très-considérable.

On pourrait encore faire ces mesures par d'autres procédés : on pourrait, par exemple, mesurer le temps qu'une protubérance met à passer sur la fente, ou encore mesurer sa hauteur par le cercle de déclinaison, en faisant, bien entendu, les corrections relatives à l'angle de position; mais ce procédé lui-même n'est pas très-expéditif, et, par conséquent, on ne peut pas l'employer dans certaines circonstances où il importe d'opérer promptement, où les phénomènes doivent être, pour ainsi dire, pris au vol, à cause de la rapidité avec laquelle ils se modifient et se transforment.

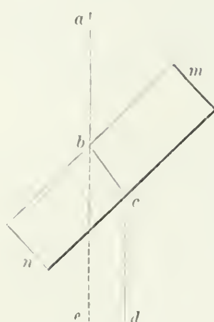
Nous avons imaginé deux méthodes qui nous paraissent faciles et suffisamment rapides. Voici la première : au chercheur de la lunette équatoriale (*fig.* 151) est fixée une tige *t*S portant un écran de carton blanc MN, perpendiculaire à l'axe optique de l'instrument; on fixe cet écran à une distance

convenable et l'on y projette l'image du Soleil *l*. Lorsqu'on aperçoit une grande protubérance, on dispose l'instrument de manière que le bord de la fente qui est du côté du Soleil touche le sommet de cette protubérance; alors on trace, ou bien on fait tracer par un aide le contour de l'image solaire formée sur l'écran dans la région qui correspond à la protubérance. Cela fait, on déplace l'instrument et l'on amène le même bord de la fente à la base de la protubérance, et l'on marque de nouveau la place du bord solaire sur le carton. La distance des deux arcs parallèles ainsi tracés mesure évidemment la hauteur qu'aurait eue sur le carton l'image de la protubérance. Pour fixer la valeur angulaire des grandeurs ainsi déterminées, il suffit de mesurer une fois pour toutes sur l'écran une longueur quelconque, par exemple la distance d'une tache au bord solaire. On se servira pour cela des cercles de l'équatorial ou bien de la méthode des passages; on pourra ainsi construire une échelle de proportion qui servira à mesurer les dimensions des dessins. Nous avons trouvé dans notre instrument qu'une longueur de 1 millimètre correspond à 8 secondes, ce qui nous donne une exactitude suffisante dans la mesure de ces objets si fugaces. Lorsqu'on emploie un spectroscope à vision directe, on remplace avantageusement le carton par un verre dépoli.

On peut obtenir une plus grande précision avec le micromètre à lame de verre épaisse, inventé jadis par M. Porro, et que nous avons appliqué avec succès à ces sortes de mesures. Supposons un rayon lumineux qui suit la droite *ae* (*fig.* 161). Au point *b*, on interpose une lame de verre à faces parallèles, disposée obliquement par rapport à la droite *ae*; le rayon lumineux est réfracté de *b* en *c*, et il sortira suivant la direction *cd* parallèle à sa direction primitive *ab*. Le déplacement,

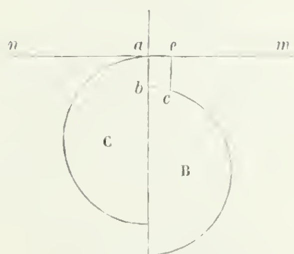
c'est-à-dire la distance des deux droites parallèles *ae* et *cd*, est fonction de l'inclinaison de la lame, de son indice de réfraction et de son épaisseur.

Fig. 161.



Si l'on place une lame semblable en avant de la fente du spectroscope, l'objet qu'on examine paraîtra entièrement déplacé; mais, si elle n'en recouvre qu'une moitié, cette moitié paraîtra seule déplacée, tandis que l'autre conservera sa

Fig. 162.



position normale. Ainsi l'image du Soleil sera partagée en deux parties : l'une restera en *a* (*fig.* 162), où l'œil de l'observateur la voit directement, l'autre sera amenée en *c* par la réfraction.

S'il y a une protubérance auprès du point *c*, on pourra, en

inclinant la lame, abaisser le bord *b* de manière à amener le sommet *e* de la protubérance à la même hauteur que le bord *a*, ce qu'on pourra faire avec la plus grande exactitude, grâce à la fente qui est disposée tangentiellement au point *a* du disque. Il suffira de mesurer l'inclinaison de la lame qui a produit ce déplacement, et l'on aura toutes les données nécessaires pour calculer la hauteur en fonction de l'inclinaison.

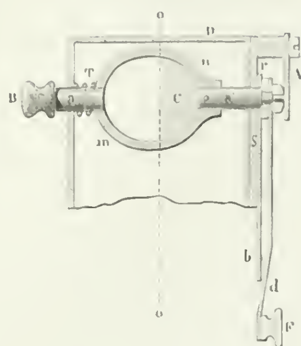
Du reste, on peut se dispenser des calculs en construisant empiriquement une Table dans laquelle, en face des différentes valeurs de l'inclinaison, on inscrit les valeurs correspondantes des déplacements exprimés en mesures angulaires; on emploie pour cela les cercles de l'instrument ou bien la méthode des passages qu'on applique à la mesure d'un déplacement connu.

Cette méthode est susceptible d'une grande précision; de plus, elle présente une grande sensibilité, car, le déplacement dépendant de l'épaisseur de la lame, il suffit de prendre une épaisseur convenable pour obtenir un déplacement aussi grand qu'on le voudra. En pratique, les lames qui nous paraissent plus commodes ont une épaisseur de 4 à 5 millimètres.

La *fig.* 163 représente l'intérieur de l'appareil qui est adapté à notre équatorial; la *fig.* 164 représente son aspect extérieur. La lame de verre est portée par un châssis ovale *mn* dont les deux extrémités se terminent par des pivots *a*, *a'* qui constituent l'axe de rotation. Un index *d*, mobile devant un demi-cercle gradué *b*, sert à mesurer l'inclinaison de la lame sur l'axe optique de la lunette. On doit d'abord déterminer la position de l'index pour laquelle la lame est perpendiculaire à l'axe, puis on transporte l'index sur le demi-cercle jusqu'à ce que le sommet de la protubérance soit au niveau

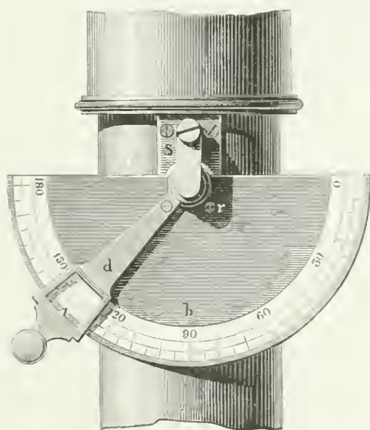
du bord solaire; on note le nombre de degrés parcourus par l'index, et, en face de ce nombre, on trouvera dans la table

Fig. 163.



la hauteur de la protubérance. On peut se dispenser de déterminer la position de l'index qui correspond au zéro : il suffit

Fig. 164.



de faire deux mesures pour deux positions symétriques de la lame et de prendre la moitié de l'arc parcouru par l'index.

En employant l'une de ces deux méthodes, on mesurera avec facilité les hauteurs des protubérances, quoiqu'elles at-

teignent quelquefois plusieurs minutes. Comme leurs formes sont très-variables et qu'elles changent presque à vue d'œil dans certains moments, le procédé le plus expéditif est celui qu'il faut préférer en pratique ; c'est pour cela que nous nous servons ordinairement des projections, quoiqu'on obtienne ainsi des résultats moins précis.

Lorsqu'on se sert de l'héliospectroscope qui porte un prisme en avant de la fente ([1]), on peut mesurer la hauteur des protubérances sans employer d'autre micromètre que les raies spectrales elles-mêmes : il suffit d'observer quelle est la raie qui correspond au bord du Soleil lorsqu'une raie déterminée, C par exemple, commence à se renverser.

([1]) *Voir* t. I, p. 233.

CHAPITRE II.

CLASSIFICATION DES PROTUBÉRANCES.

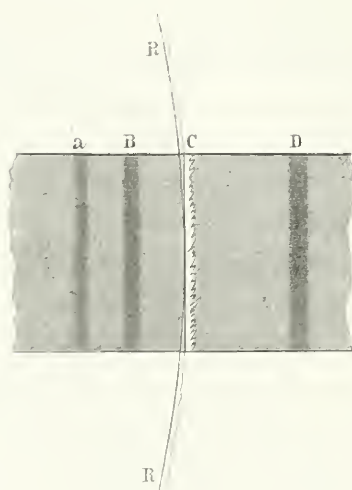
§ I. — *Aspect de la chromosphère.*

En employant le spectroscope comme nous l'avons expliqué dans le Chapitre précédent, on arrive facilement à reconnaître et à étudier la chromosphère et les protubérances. La chromosphère, dont nous voulons parler dans ce paragraphe, est une couche continue qui enveloppe le Soleil de toutes parts. Lorsqu'on dispose la fente perpendiculairement au bord du disque, on trouve partout les pointes brillantes des raies renversées de l'hydrogène, c'est-à-dire $C = H\alpha$; $F = H\beta$; *h* près de $G = H\gamma$; la quatrième $H\delta$ est très-difficile à voir; mais on l'a reconnue avec certitude. De plus, on trouve une raie D_3 auprès des raies D du sodium; elle est placée du côté du bleu, à une distance égale à 2,06 fois la distance qui sépare les raies D_1 et D_2 de ce métal. La nature de la substance qui produit la raie D_3 est encore inconnue; on a proposé de l'appeler *hélium*.

La chromosphère n'a pas été, à proprement parler, découverte par le spectroscope; pendant les éclipses, on avait déjà reconnu son existence, et les observateurs l'avaient désignée par différents noms : *sierra*, *vagues*, *arc rose* brillant. Le spectroscope a seulement constaté que cette couche colorée existe toujours et sur tous les points de la surface du Soleil, quoiqu'elle n'ait pas partout et toujours la même épaisseur.

Pour se faire une idée exacte de la chromosphère et de sa structure, il faut l'étudier en élargissant médiocrement la fente du collimateur et en la disposant tangentiellement au disque. Lorsque le bord du disque se trouve un peu en dehors de la fente, de sorte que ses rayons ne puissent pas gêner la vue, les raies spectrales les plus fines disparaissent à cause de la largeur de la fente; on ne voit plus que les principales *a*, B, C, D, encore sont-elles diffuses et mal terminées.

Fig. 165.



Au moment où la chromosphère entre dans le champ, sur ce fond obscur, on aperçoit à la place de C une ligne très-vive et très-brillante; son aspect est tout à fait comparable à celui que présente la raie C de Fraunhofer renversée lorsqu'on examine le spectre avec une fente étroite; la seule différence est que cette ligne a son bord extérieur garni de franges (*fig.* 165). Lorsque l'atmosphère terrestre est agitée, on ne parvient à voir cette ligne brillante que dans la région très-voisine du disque solaire où la scintillation du bord se fait

sentir dans le spectroscope. Il est même très-surprenant qu'elle demeure si tranquille, malgré la scintillation dont nous venons de parler. Voici comment nous expliquons ce phénomène. Les oscillations de l'air font passer à travers la fente une petite quantité de lumière provenant du bord solaire; ce ne sont pas des rayons continus, mais des espèces de vagues intermittentes. Cette lumière, étant blanche, forme un spectre complet qui envahit, non-seulement la raie C, mais aussi toutes les autres. La raie C demeure immobile, parce que, étant monochromatique, son indice de réfraction ne change pas; son intensité est à peu près invariable, parce que l'invasion de la lumière blanche est légère et rapide et qu'elle est réduite par le spectroscope à la même couleur de la raie C.

Lorsqu'on examine la chromosphère avec un faible grossissement, il semble, en général, que son contour est nettement terminé, comme serait la surface d'une couche liquide; avec un grossissement convenable, on aperçoit plus nettement les détails de sa structure.

1° A sa base, c'est-à-dire dans la partie intérieure qui se trouve immédiatement en contact avec la surface du Soleil, elle a une teinte plus vive que dans sa partie supérieure, et c'est pour cela que, la fente du spectroscope étant perpendiculaire au disque, on voit les raies se terminer en pointes effilées. Cette couche paraît plus ou moins élevée, suivant l'instrument que l'on emploie; son élévation paraîtra plus considérable si le prisme possède un grand pouvoir dispersif, parce qu'alors il affaiblit davantage la lumière de l'atmosphère terrestre. Les observations spectrales nous donnent une hauteur de 10 à 15 secondes; mais les phénomènes observés pendant les éclipses prouvent que cette valeur est trop faible; d'après les observations de Eastman à Syracuse, et de

M. Respighi aux Indes [1], on aperçoit une faible coloration rose à une distance de quelques minutes. Quant aux observations qui se font en plein jour, la partie visible dans ces conditions se termine là où son intensité lumineuse devient égale à celle de la lumière atmosphérique dispersée par le prisme; son étendue dépend donc de l'état du ciel et de la puissance de l'instrument. Lorsque le ciel est pur, elle paraît vive et nettement tranchée; elle semble plus basse lorsque le temps est un peu brumeux; elle disparaît complétement lorsqu'il y a des cirrus contenant des aiguilles de glace.

2° En général, la chromosphère est mal terminée et sa surface extérieure est garnie de franges. La *Pl. A* représente l'aspect qu'elle offre le plus ordinairement avec un grossissement considérable. Elle est presque toujours recouverte de petits filets terminés en pointe et tout à fait semblables à des *poils;* on voit quelquefois des étendues considérables où ces filets sont tous inclinés dans le même sens (*fig.* 1); souvent aussi ils sont inclinés dans des directions contraires, soit convergentes (*Pl. A*, *fig.* 2), soit divergentes (*Pl. A*, *fig.* 3). L'aspect représenté dans la *fig.* 2 est très-fréquent dans le voisinage des pôles; quelquefois le changement de direction se produit très-nettement au pôle même, où l'on aperçoit alors une série de filets droits et verticaux plus élevés que les autres. Dans d'autres circonstances, au lieu d'être terminés en pointe, ils sont renflés à l'extrémité, ramifiés et recourbés; l'ensemble représente assez bien une haie d'arbrisseaux entrelacés (*Pl. A*, *fig.* 4).

Ces filets se développent quelquefois et forment de véritables flammes dont l'ensemble offre un aspect analogue à

---

[1] *Voir* t. I, p. 411.

1 

 2

3 

 4

5 

 6

7 

 8

9 

 10

celui que présente un champ dans lequel on brûle des herbes après la moisson (*Pl. A*, *fig.* 5). Ces flammes sont quelquefois si petites et si fines qu'elles ressemblent au gazon qui orne nos jardins. Ces petits filets sont évidemment des flammes dont les dimensions réelles sont extrêmement considérables, car ils sous-tendent des angles de $\frac{1}{5}$ ou $\frac{1}{3}$ de seconde, c'est-à-dire que leur largeur est de 100 ou 200 kilomètres, tandis que leur hauteur est au moins trois fois plus grande. Cette apparence de flammes petites et fines se présente très-habituellement, surtout dans le voisinage de l'équateur; la direction des flammes change d'un moment à l'autre avec une rapidité effrayante.

Les petits filets analogues à des *poils* se remarquent surtout dans les régions de calme; ils recouvrent quelquefois des étendues immenses, et même plus du quart de la circonférence, toujours inclinés dans le même sens; mais on les voit changer brusquement de direction : de convergents ils deviennent divergents et réciproquement. Lorsque les filets sont très-bas, leur direction est ordinairement très-variable; elle n'est sensiblement constante que quand ils acquièrent des hauteurs considérables, par exemple 15 ou 20 secondes; alors ils restent stables dans une grande étendue.

Ces variations nous avaient fait craindre quelque illusion; mais tous les doutes ont été levés par des observations faites simultanément par M. Tacchini, à Palerme, et par nous à Rome (1872, 4 février, 18 juin, etc.). En comparant les dessins faits ainsi d'une manière indépendante, nous avons reconnu plusieurs points de rebroussement situés exactement à la même place, et nous avons pu nous convaincre que la structure du contour tout entier présentait la même apparence aux deux observateurs : il n'y a donc point d'illusion à craindre; les phénomènes que nous venons d'exposer au lec-

teur ne sont pas de simples apparences, ce sont des objets bien réellement existants, fidèlement représentés à nos yeux par les instruments que nous employons pour les observer.

Jusqu'à présent, cependant, il nous a été impossible de formuler une loi relativement à la direction des filets lumineux; la seule chose qui nous paraît certaine, c'est qu'ils présentent des tendances très-diverses, suivant qu'on les examine à une époque de calme ou à une époque d'activité solaire. Dans le second cas, leur direction est plus constante et plus régulière : l'inclinaison dominante est vers les pôles. Dans les époques de calme il y a moins de régularité, ou du moins cette régularité n'est pas aussi générale : elle ne règne habituellement que dans la région comprise entre le pôle et le 40e degré de latitude; sur le reste de la surface, les filets sont plus communément inclinés vers l'équateur : il n'est cependant pas rare de les voir disposés en sens contraire sur des espaces très-étendus. Actuellement (mai-août 1875) nous passons par une époque de calme où les taches et les protubérances font presque complétement défaut : la photosphère est très-basse, à peine 4 à 5 secondes; elle est quelquefois formée d'une simple ligne garnie de nœuds et de franges tellement petites qu'on a peine à les distinguer.

Il arrive souvent, surtout dans la région des taches, que la chromosphère présente l'aspect d'un réseau très-vif dont la surface, inégale et raboteuse, semble composée de nuages brillants analogues à nos cumuli; la disposition de ces nuages ressemble à celle des grains de chapelet; quelques-uns d'entre eux se dilatent de manière à former de petites élévations diffuses sur les bords (*Pl. A*, *fig.* 6).

Ces élévations diffuses prennent tous les aspects et toutes les dimensions, jusqu'à devenir des protubérances; il n'y a donc pas de limite précise et tranchée entre ces deux sortes

de phénomènes; lorsqu'un de ces monticules s'élève au-dessus de 30 secondes, nous le rangeons parmi les protubérances.

Dans quelques circonstances on observe une diffusion considérable; les régions supérieures ressemblent à un crépuscule dont les teintes, vivement accentuées, vont en s'évanouissant progressivement (*Pl. A, fig.* 7); il est rare que la surface soit parfaitement régulière comme celle d'un liquide (*Pl. A, fig.* 8); on y voit assez souvent des pointes très-brillantes et très-courtes (*Pl. A, fig.* 9); mais alors on peut être certain qu'une éruption violente est sur le point de se produire.

La chromosphère existe sur tous les points de la surface solaire, même au-dessus des taches; il est vrai qu'elle n'a pas partout la même hauteur et que, en certains endroits, elle peut être très-basse. La clarté et la netteté plus ou moins grandes avec lesquelles on l'aperçoit sont le meilleur moyen de juger si l'état de l'atmosphère est favorable aux observations. Lorsqu'on ne la distingue pas bien nettement, lorsque son éclat ne paraît pas bien vif, il est inutile d'observer, car on ne verra pas les protubérances dont l'éclat est ordinairement moins vif que le sien.

Dans notre longue carrière d'observateur, nous n'avons vu qu'une seule fois la chromosphère échancrée en un point; elle faisait défaut sur une étendue très-peu considérable, à un endroit qui ne correspondait même pas à une tache, ou plutôt elle paraissait éclipsée par un corps opaque qui laissait cependant apercevoir à la base un filet mince, mais assez visible (*Pl. A, fig.* 10). On a quelquefois avancé que, au-dessus des taches, la couche rose devient extrêmement mince, lorsqu'elle ne disparaît pas complétement : c'est une erreur manifeste; non-seulement on aperçoit la chromosphère au-des-

sus des taches et dans les environs, mais nous verrons bientôt que dans ces régions elle paraît plus brillante et plus élevée.

3° La hauteur de la chromosphère n'est pas uniforme sur tout le contour du disque solaire; il y a surtout deux régions qui sont particulièrement remarquables : ce sont les pôles et la région des taches. Dans la région des taches, on aperçoit souvent de petites flammes qui convergent vers les centres d'éruption; ces flammes ont quelquefois un aspect dentelé avec des ramifications; dans d'autres moments elles ressemblent à des cumuli garnis de pointes. Aux pôles, elles sont d'ordinaire plus élevées, mais les filets sont droits, très-minces et très-brillants. L'état de la chromosphère dépend de l'activité générale du Soleil; mais dans les régions polaires, même aux époques de calme presque absolu, il y a toujours une activité assez grande qui se manifeste par l'éclat et les dimensions des flammes que nous venons de décrire. Actuellement (août 1875) la chromosphère est plus élevée aux pôles qu'à l'équateur.

Lorsque nous aurons mieux étudié les relations qui existent entre les protubérances et l'état de la photosphère, nous pourrons faire remarquer que les granulations de la surface dépendent des filaments chromosphériques dont nous venons de parler; bornons-nous, pour le moment, à la description des phénomènes.

§ II. — *Classification des protubérances d'après leurs formes.*

Les protubérances se présentent sous des aspects si bizarres et si capricieux qu'il est absolument impossible de les décrire avec quelque exactitude. Sous ce nom de protubérance nous

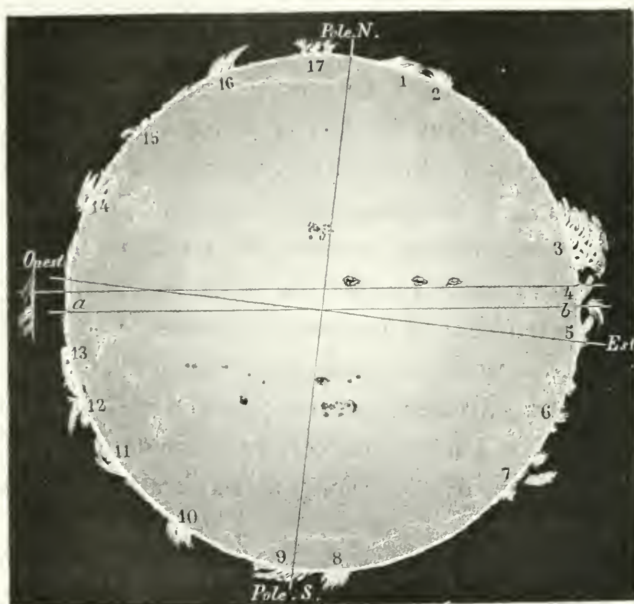
désignons les phénomènes les plus variés, depuis les simples exagérations dans l'épaisseur de la chromosphère jusqu'aux éruptions gigantesques dont la hauteur peut atteindre le quart du diamètre solaire, c'est-à-dire cinquante-quatre fois le rayon de la Terre. Malgré cette immense variété de formes, on a réussi, grâce à des observations nombreuses, à ramener les phénomènes ordinaires à un petit nombre de types que nous allons faire connaître; mais, dans les crises violentes, ces flammes présentent des volumes si extraordinaires, des mouvements si rapides, des intensités si variables, que l'observateur est plongé dans la plus profonde admiration et, en même temps, dans le plus étrange embarras, à cause de l'extrême difficulté, de l'impossibilité véritable où il se trouve de reproduire exactement ce qui s'offre à ses yeux.

Nous croyons, dans l'intérêt de la science, ne pas devoir éblouir le lecteur en lui présentant pêle-mêle une suite de dessins, exacts sans doute, mais extraordinaires, destinés à le surprendre et à satisfaire sa curiosité plutôt qu'à l'instruire : nous chercherons à mettre un certain ordre dans cette exposition, afin de préparer les esprits à l'explication des phénomènes.

Il importe de se faire tout d'abord une idée exacte de l'ensemble des protubérances, comme nous les verrions si la lumière éblouissante du globe solaire qui nous cache ces appendices venait à disparaître complétement. Les figures des éclipses que nous avons reproduites dans le volume précédent nous paraissent insuffisantes; nous avons représenté dans la *fig.* 166 le contour du Soleil tel qu'il fut observé le 23 juillet 1871; il faut remarquer que cette figure correspond à une époque de grande activité, et cependant les masses les plus élevées sont loin d'atteindre le maximum, car elles n'ont que 2′40″, tandis que nous en avons observé qui

atteignaient 7′30″. Dans les époques de calme, elles sont bien moins nombreuses; on n'en trouve quelquefois que deux ou trois d'une élévation peu considérable. C'est ce qui arrive actuellement (août 1875), aussi serions-nous porté à nous demander si ce que nous avons vu tant de fois n'était pas un rêve!

Fig. 166.



Dans cette *fig.* 166, on voit, à droite du pôle nord, deux flammes opposées (1, 2) suivies d'un arc magnifique de chromosphère garnie de petites flammes. Plus loin (3), on voit une masse énorme de jets qui se croisent dans toutes les directions : leurs sommets se diffusent et forment une masse nuageuse. Les flammes (4, 5) sont surmontées d'un nuage isolé et suspendu dans l'atmosphère. De 6 à 7, on voit une multitude de petites flammes et un autre nuage isolé. Tout

près du pôle sud (8 et 9), nous trouvons deux autres masses de flammes : la première est inclinée vers le pôle, la seconde est inclinée dans la même direction, et, par conséquent, s'éloigne du pôle. Au point 10, on voit une masse de flamme inclinée en sens contraire des précédentes. Plus loin (11), une autre masse composée de deux amas convergents. Nous voyons ensuite (12, 13) un ensemble très-compliqué de jets; l'un d'entre eux présente la forme d'un arc très-allongé enveloppant un grand nombre de flammes du même groupe. Au-dessus d'une tache (14), on voit des jets très-vifs et très-brillants dirigés vers le pôle nord. Au n° 15, un petit groupe de jets divergents; puis (16) une flamme très-belle dirigée vers le pôle nord. Tout près du pôle (17), on remarque une chaîne de jets verticaux semblables à des gerbes. A l'extrémité ouest on voit une figure détachée qui représente la variation subie en quelques minutes par la protubérance n° 13.

Ces protubérances ne peuvent être bien comprises que si l'on en donne un grand nombre d'exemples; aussi allons-nous donner à cette question tous les développements qu'elle comporte.

Pour que le lecteur puisse se former une idée exacte des caractères physiques que présentent ces phénomènes lorsqu'on les observe au spectroscope, nous avons fait dresser, d'après nos propres observations, les *Pl. B* et suivantes, où les détails sont reproduits avec une admirable fidélité. Nous avons la certitude que ces dessins sont très-exacts pour ce qui concerne les caractères généraux. Pour nous assurer de la réalité des objets que nous avions sous les yeux, nous avons entrepris plus tard, conjointement avec M. Tacchini et M. Lorenzoni, une série d'observations qui ne nous laissent aucun doute à cet égard.

Ces figures sont tirées de la nombreuse série de dessins

que nous recueillons depuis sept ans. Dans les planches *B* et *C*, nous les avons choisies de manière à donner au lecteur des échantillons de trois structures fondamentales que nous appellerons structure *filamenteuse*, *nubiforme*, *rayonnée*. Nous nous réservons de donner plus tard les explications qui sont indispensables ; les figures que nous donnons en ce moment serviront de types pour faire comprendre notre langage ; elles suppléeront à la multitude de dessins qui seraient nécessaires pour bien nous faire comprendre et qu'il est impossible d'exécuter avec la même perfection.

Mais il est une chose que la peinture ne pourra jamais reproduire : c'est la vivacité des teintes que présentent ces masses énormes, et la rapidité des mouvements dont elles sont animées au moment où la force éruptive les lance de l'intérieur au-dessus de la surface du Soleil. Les meilleurs dessins seront toujours des corps sans vie, de véritables cadavres, si on les compare aux phénomènes que nous présente la nature : ces masses incandescentes sont animées d'une activité intérieure où semble respirer la vie ; elles brillent d'un vif éclat, et ces couleurs qui les embellissent forment un caractère spécifique, moyennant lequel nous pouvons reconnaitre, par l'analyse spectrale, la nature chimique des substances qui les composent : on ne peut retrouver rien de semblable dans les dessins les plus parfaits.

Les formes des protubérances sont très-multiples ; pour mettre un peu d'ordre dans cette classification, nous adopterons d'abord une division qui se présente tout naturellement à l'esprit ; nous parlerons successivement, dans les deux paragraphes suivants, des formes simples et des formes composées.

1



2



3



§ III. — *Des formes simples.*

Nous caractériserons les différentes formes simples en les désignant par des expressions figurées; cette manière de procéder présente des inconvénients, nous le savons, mais il est impossible de faire autrement, sous peine d'inventer pour chaque objet nouveau des expressions absolument nouvelles, et d'introduire dans la langue la barbarie avec le néologisme : les expressions que nous employons ont l'avantage d'être françaises, faciles à retenir, et de donner par elles-mêmes une idée de l'objet dont nous voulons parler. Les différentes formes simples que nous avons remarquées dans les protubérances seront désignées par les mots suivants : *amas*, *flammes*, *gerbes*, *panaches*, *éventails*, *rayons*, *nuages*.

1° *Amas brillants* (*Pl. D, fig.* 1). — Ces amas de matière rouge ont une grande ressemblance avec les nuages auxquels nous donnons le nom de *cumuli;* ils sont en général très-vifs et plus brillants que la chromosphère, dont ils paraissent être une simple exagération. Au premier abord, on n'y aperçoit qu'une masse confuse, homogène, sans aucune trace d'organisation; mais, en examinant avec une attention soutenue et prolongée, et surtout en employant des grossissements de plus en plus considérables, on voit apparaître des irrégularités analogues à celles de nos cumuli; on voit qu'ils sont souvent terminés par de petites pointes (*Pl. D, fig.* 1, *a*); les bords sont rarement estompés (*Pl. D, fig.* 1, *b*). Quoiqu'ils aient une grande ressemblance avec les nuages de notre atmosphère, leur contour n'est jamais aussi arrondi, aussi nettement tranché.

Ces masses sont rarement permanentes; elles précèdent ordinairement les grandes éruptions, aussi faut-il les surveil-

ler avec soin. Elles atteignent rarement une grande hauteur; les plus élevées ne dépassent pas 30 ou 40 secondes (22500 ou 28000 kilomètres). Elles se soulèvent quelquefois comme des ballons, en restant reliées à la chromosphère par un cordon brillant (*Pl. D*, *fig.* 2, *a*).

2° *Amas nébuleux* (*Pl. D*, *fig.* 2). — Cette forme semble être un développement de la précédente; mais elle s'en distingue par une moins grande intensité lumineuse. Les masses que nous classons dans cette catégorie ressemblent beaucoup aux nuages terrestres, mais elles sont diffuses sur leurs bords (*Pl. D*, *fig.* 2, *b*, *c*). La forme *a* est rare; nous l'avons vue, le 21 juillet 1872, se développer sous nos yeux en quelques minutes; elle ne tarda pas à s'évanouir; elle présentait une coloration très-vive.

Lorsque les nuages filamenteux arrivent à une certaine hauteur, ils se dilatent et se diffusent : telle est l'origine ordinaire des amas nébuleux qui occupent presque toujours le sommet des nuages brillants sous forme de fumées denses (*Pl. B*, *fig.* 2). Quelquefois ces fumées semblent reposer immédiatement au-dessus de la chromosphère; le nuage d'où elles sont sorties existe cependant; si on ne le voit pas, c'est qu'il n'est pas exactement sur le bord du Soleil; il suffit qu'il se trouve un peu en avant ou en arrière pour être invisible.

3° *Amas diffus*. — Nous désignons par ce mot toutes ces formes indécises, mal terminées, qui se présentent comme des brouillards légers ou des traînées de fumée légère, et donnent à la chromosphère l'apparence d'un ciel pommelé (*Pl. D*, *fig.* 3). Ces *amas diffus* sont caractérisés par une structure réticulaire et comme cellulaire : ils sont donc loin de ressembler aux cumuli. On peut les comparer aux brouillards qui se forment dans les régions élevées de notre atmo-

sphère, ou bien à des *stratum* en voie de dissolution, ou encore à des fumées qui se dissipent dans l'air. Leur caractère spécial, c'est cette forme indécise d'une vapeur qui se dissout et s'évanouit; ils se forment au sommet des masses filamenteuses, comme on le voit *Pl. B*, *fig*. 3.

On peut rapporter à cette catégorie certaines masses diffuses qui s'évanouissent insensiblement à une certaine distance du bord. Leur aspect et leur coloration rappellent les teintes de l'aurore; elles imitent en petit ce que nous voyons à l'horizon lorsque le Soleil levant éclaire un ciel légèrement brumeux.

Flammes. — La forme la plus habituelle est celle de flammes à structure filamenteuse; on peut comprendre sous cette dénomination des variétés extrêmement nombreuses, que nous réduirons à quelques types principaux.

4° *Masses flamboyantes*. — Ce sont d'ordinaire de simples exagérations de la chromosphère : quelques filets s'allongent, se soulèvent à une grande hauteur, tout en restant inclinés dans le même sens que ceux qui les entourent; ils sont faiblement lumineux et leur éclat va en s'affaiblissant d'une manière progressive (*Pl. D*, *fig*. 4).

5° *Flammes*. — Cette classe est la plus nombreuse et la mieux définie : les *fig*. 5 et 6 (*Pl. D*) en représentent les formes principales. Elles sont caractérisées par leur figure conique et par la direction des filets qui les composent : cette direction est ordinairement différente de celle des filets de la chromosphère. Les flammes sont rarement droites; elles sont ordinairement recourbées, comme si un courant violent les emportait; quelquefois même elles sont si fortement inclinées qu'elles touchent la chromosphère par leurs deux extrémités (*Pl. D*, *fig*. 7). Dans d'autres circonstances, elles présentent une double courbure (*ibid.*); en réalité, cette flamme est animée

d'un mouvement spiral dont nous ne voyons que la projection. Ces formes coniques sont souvent accouplées deux à deux et dirigées en sens opposé (*Pl. D, fig.* 6); mais il y a là une illusion d'optique due à un effet de perspective; car il est évident qu'elles ne sont pas toujours dans un même plan, comme les apparences nous porteraient à le croire. On voit dans la *Pl. C, fig.* 1, un exemple magnifique de ces spirales s'élevant rapidement pour se dissoudre ensuite.

Les flammes se divisent souvent à leur partie supérieure en plusieurs branches qui suivent des directions différentes (*Pl. D, fig.* 8 et 9, *b*); quelquefois même le sommet se recourbe dans une direction opposée à celle dans laquelle s'inclinait la partie inférieure (*Pl. D, fig.* 8, *a*) comme si l'impulsion violente qui a lancé la matière dans une première direction était dominée par un vent puissant régnant dans les régions supérieures; la forme *a* (*Pl. D, fig.* 9) ferait croire que la matière incandescente, arrivée à une certaine hauteur, retombe vers la surface du Soleil en vertu de son propre poids. Les flammes filamenteuses sont souvent dominées par des amas de nuages semblables à de légères fumées que le vent emporte dans les airs (*Pl. C, fig.* 1 et *Pl. D, fig.* 10).

6° *Fleurs.* — Nous désignerons ainsi deux formes assez différentes : la première est caractérisée par des filets convergeant vers le sommet; l'ensemble présente l'aspect d'un choufleur (*Pl. E, fig* 1, *a*). Dans la seconde, les filets sont divergents et disposés de manière à imiter à peu près la fleur de la giroflée (*ibid.*, *b*). On rencontre souvent ces fleurs juxtaposées de manière à former de longues chaînes ; quelquefois elles sont comme suspendues au-dessus de la chromosphère, sans être reliées avec elle par une tige colorée (*Pl. E, fig.* 2). En général, elles sont légères et peu lumineuses. Leur étendue est considérable : elles occupent quel-

1

2





3

quefois 30 ou 40 degrés en latitude, et, comme elles mettent trois ou quatre jours à passer sur le contour du disque, on voit qu'elles ne sont pas moins étendues en longitude.

Cette structure semble, au premier abord, supposer une éruption se produisant par des ouvertures pratiquées dans la photosphère. Cette hypothèse n'est nullement indispensable : bien souvent, nous avons observé dans les hautes régions de l'atmosphère terrestre des nuages présentant des formes semblables les jours où le vent était sur le point de changer de direction : les cirri à structure filamenteuse repliés sur eux-mêmes représentaient parfaitement les fleurs suspendues dont nous venons de parler. Il est donc évident que pour expliquer cette forme il n'est pas nécessaire de supposer qu'il y a des trous d'éruption; cette remarque est très-importante pour la théorie.

7° *Gerbes et éventails.* — Les filets divergents présentent quelquefois l'aspect d'un éventail, ou plutôt celui d'un panache fait avec des plumes flexibles (*Pl. E*, *fig.* 3). Ces gerbes atteignent quelquefois des dimensions colossales: leur aspect est grandiose et d'une beauté ravissante : les feux d'artifice les plus brillants peuvent à peine en donner une idée. Nous les diviserons en deux classes très-distinctes : les unes brillent d'une lumière calme et tranquille, et cette immobilité, loin de nuire à l'impression que produit leur aspect, leur communique, au contraire, quelque chose de majestueux et d'imposant. C'est là ce que nous nommerons de préférence *panache* ou éventail. On en voit un exemple dans la protubérance observée le 27 juin 1872 (*Pl. E*, *fig.* 3).

Nous donnerons spécialement le nom de *gerbes* à d'autres phénomènes dont la forme paraît la même au premier abord, mais dont la structure est très-différente (*Pl. G*, *fig.* 5 à 8). Les filets très-lumineux, très-déliés et parfaitement tranchés

sont d'une mobilité extraordinaire. Nous ne signalons pas d'autres caractères en ce moment, mais nous verrons bientôt qu'il y a entre ces deux classes des différences plus profondes et plus caractéristiques.

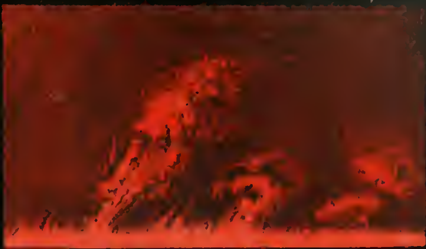
8° *Systèmes rayonnants.* — Cette forme, très-intéressante, présente l'aspect d'un éventail formé par des rayons droits et divergents ayant la forme de cônes très-aigus (*Pl. E*, *fig.* 4, *a*). Les pointes sont ordinairement très-courtes et très-vives, et elles sont le signal de violentes éruptions. M. Tacchini est le premier qui ait observé ces rayons; nous les avons vus une fois atteindre une longueur énorme en demeurant parfaitement droits (*Pl. C*, *fig.* 3). Cette forme rectiligne est cependant peu stable; ils ne tardent pas à se recourber légèrement, et c'est ainsi qu'on les observe le plus souvent. On voit un exemple de cette transformation dans la *Pl. E*, *fig.* 5 et 6; il a suffi de quelques minutes pour que la protubérance présentât successivement les deux aspects indiqués par notre dessin. Ces rayons rectilignes s'allongent quelquefois avec une effrayante rapidité. Le 1er juillet 1870, nous en avons vu qui, en quatre minutes, s'accrurent de 2′20″ : la vitesse était donc de 421 kilomètres par seconde. C'est à cette date que se rapporte la *fig.* 3 (*Pl. C*). Quelquefois les pointes, tout en restant très-brillantes, sont recourbées, arrondies et émoussées, (*Pl. E*, *fig.* 4, *b* et *c*).

Outre ces rayons divergents en forme de cônes, on observe quelquefois des systèmes de rayons filiformes très-déliés et très-élégants. La *fig.* 7, *Pl. E*, représente celle que nous avons observée à Rome le 21 avril 1873, à 9^{h}40^{m}; à 8^{h}44^{m}, M. Tacchini observait la même protubérance à Palerme, et faisait le dessin reproduit dans la *fig.* 8. Sur le fond, fortement éclairé, se dessinaient des rayons très-déliés, divergeant en forme de gloire et présentant un vif éclat jusque auprès de

1 b,c



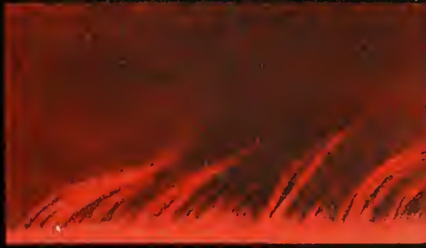
2 a,b,c.



3



4



5



6



7



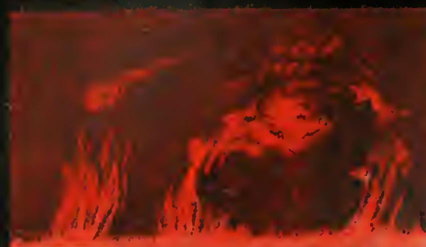
8 a,b,c.

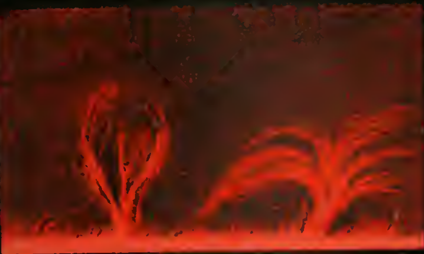


9 a,b,c



10



1 a.b


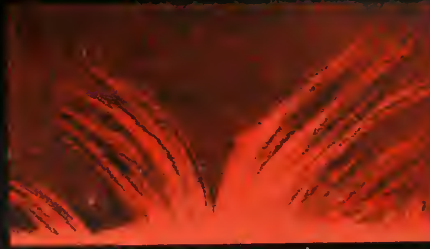

2

3 27 Juin, 1872.

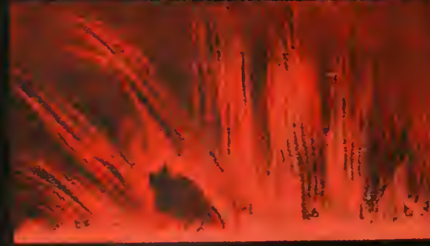


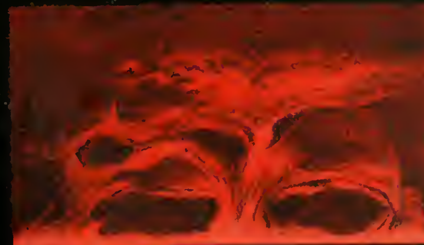
4 a.b.c

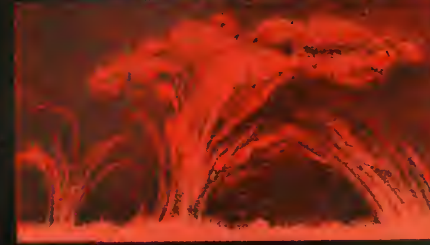
5



6

7 Rome, 21 Avril, 1873, 9h 40m.



8 Palerme, 21 Avril, 1873, 8h 44m

9



10

leur sommet. La ressemblance des deux figures montre d'une manière incontestable qu'il n'y a pas là d'illusion d'optique; ces phénomènes existaient bien réellement tels qu'ils se présentaient aux regards de l'observateur.

Il est rare que des formes aussi élégantes se présentent avec une étendue aussi considérable, mais elles se reproduisent souvent sur une plus petite échelle; quant aux systèmes de rayons minces et filiformes, on en rencontre de nombreux exemples, mais ils présentent rarement cette disposition rectiligne.

§ IV. — *Figures composées.*

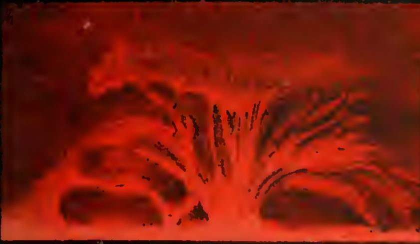
Les différentes formes que nous venons de décrire peuvent exister simultanément dans une même protubérance; il en résulte des formes composées qu'on retrouve surtout au-dessus des taches et dans les époques de grande activité. Ces combinaisons produisent des formes extrêmement diverses que nous ne saurions décrire en détail. Nous renverrons le lecteur aux grandes collections qui ont été publiées par MM. Zöllner, Huggins, Tacchini, Respighi, et par M. Tacchini et nous-même dans les *Mémoires de la Société des Spectroscopistes italiens*. M. Winlock a également fait des publications très-intéressantes dans les volumes édités par l'Observatoire de Cambridge, en Amérique. Dans les figures que nous allons publier, nous insisterons principalement sur les accidents plus ou moins compliqués que ces combinaisons introduisent dans les protubérances.

Les *fig.* 1 et 2 (*Pl. F*) et les *fig.* 9 et 10 (*Pl. E*) représentent des flammes et des panaches surmontés par des arcs et des amas nuageux qui les relient entre eux en se diffusant

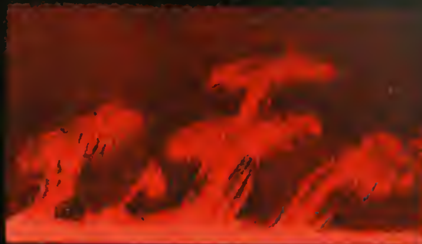
au-dessus de la masse centrale et embrassant les parties latérales. Les masses filamenteuses se résolvent en nuages vers le sommet et se répandent ensuite dans toutes les directions. Des jets coniques recourbés s'entre-croisent et produisent des formes qui paraissent indéchiffrables au premier aspect, mais qu'on réussit à reconnaître en les étudiant avec soin.

La *fig.* 3 (*Pl. F*) nous présente une structure très-simple, où les différentes branches sont faciles à suivre, car elles sont nettement définies, et l'on voit clairement comment elles s'entre-croisent. Il n'en est pas de même de la *fig.* 4 (*Pl. F*), qui présente au regard une masse confuse; et cependant la structure est la même, quoiqu'elle ait été plus difficile à étudier et à dessiner : c'est qu'ici les branches sont diffuses et estompées en même temps qu'elles sont plus nombreuses et qu'elles se croisent en un plus grand nombre de points; de là résulte une figure plus compliquée que la précédente. On verra cependant que ces deux formes ont bien la même structure en examinant de préférence la base de la seconde figure : on y trouve des espèces de trous noirs qui ressemblent à ceux de la figure précédente, sauf que les angles y sont plus arrondis, ce qui leur donne une forme ovale. Cette particularité tient aux atmosphères diffuses qui environnent les différentes branches; ces atmosphères, en se superposant aux points d'intersection, émoussent nécessairement les angles et donnent à la masse l'apparence d'un tissu cellulaire. Cette structure se présente plus compliquée dans la *fig.* 6 (*Pl. F*). Ce sont des formes analogues à celles-là qui ont suggéré à quelques observateurs la comparaison avec des arbres gigantesques dont les ramifications seraient enchevêtrées les unes dans les autres; mais une étude plus attentive a montré que cette comparaison ne donne pas une idée exacte de la réalité. Ces formes bizarres présentent des ramifications qui

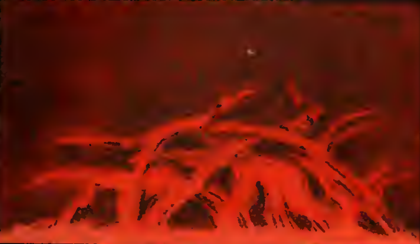
1 19 Avril 1873.



2 a,b c,d.



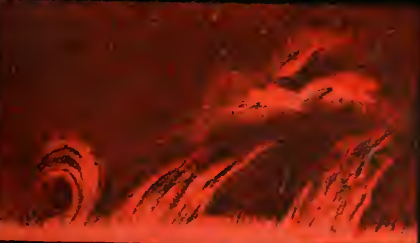
3



4



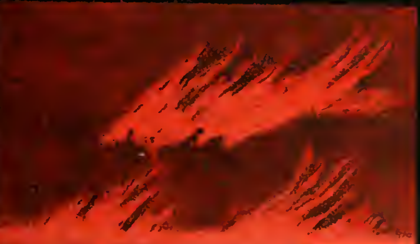
5



6



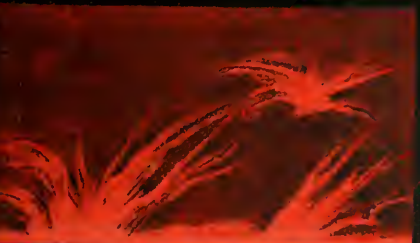
7



8



9



10



n'ont qu'une ressemblance grossière avec celle d'un arbre; encore ces ramifications ne sont-elles pas des subdivisions d'une tige commune : elles paraissent plutôt résulter de la séparation naturelle de jets différents ayant une souche commune et qui divergent à une certaine hauteur.

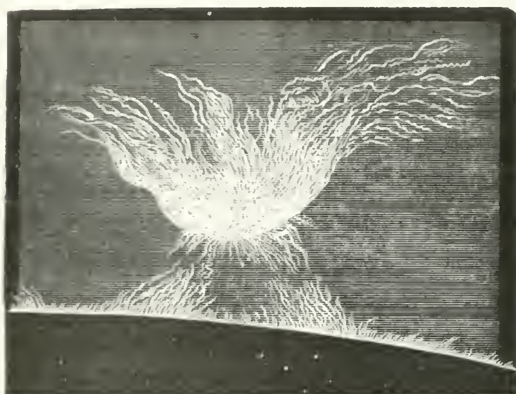
Ces jets, en se croisant, donnent naissance aux figures ovales qu'on rencontre souvent entre les fleurs alignées en longues chaînes (*Pl. E, fig.* 2). Les masses lumineuses, qui se superposent aux points d'intersection, n'étant que faiblement transparentes, il en résulte des teintes plates où le relief fait presque complétement défaut. Cette structure est quelquefois très-difficile à étudier et à dessiner, à cause des nombreux rameaux situés dans des plans différents et qui se projettent l'un sur l'autre en se croisant. Il est rare que la structure cellulaire s'étende au-dessus de la troisième rangée de cellules, mais il y en a des exemples. Chaque filet, en s'évanouissant, laisse une trace sensible qui est le prolongement de la partie la plus dense : de là ces amas nuageux cellulaires qui couronnent les protubérances.

§ V. — *Nuages suspendus.*

Nous ne désignons pas par ce nom les masses diffuses dont nous parlions il y a un instant : il s'agit ici de ces masses très-vives, assez persistantes, brillant d'un vif éclat, qui sont comme des centres de radiation lumineuse, parfaitement isolées et suspendues à une certaine hauteur au-dessus de la chromosphère. On en voit des exemples dans les *fig.* 5, 7, 9, 10 (*Pl. F*). Ces nuages lancent des filets lumineux dans toutes les directions, le plus souvent de bas en haut (*Pl. F, fig.* 7), quelquefois aussi de haut en bas, et alors on dirait une pluie de feu (*Pl. F, fig.* 8).

L'observateur peut quelquefois être témoin de la manière dont se forment ces nuages en les voyant se développer sous ses yeux. Des filets très-vifs se soulèvent, et, arrivés à une

Fig. 167.



certaine hauteur, ils se condensent en produisant des amas nébuleux brillants (*Pl. B, fig.* 2). Ces nuages, une fois for-

Fig. 168.



més, restent suspendus, et au bout de quelque temps les filets qui servaient à les alimenter finissent par disparaître. Si l'observateur n'a pas vu les phases que nous venons de décrire, il lui sera impossible de les deviner et de connaître l'origine des phénomènes qu'il étudie. Cette théorie s'applique certainement à un grand nombre de cas; elle ne peut

cependant pas expliquer la formation de tous les nuages. M. Tacchini en a vu se former pendant ses observations, sans qu'il y eût aucune trace des filets que nous venons de décrire, et qui servent, d'après notre théorie, à les produire et à les alimenter. Il arrive quelquefois que, à la place des filets ascendants, on voit les nuages rayonner de haut en bas, en produisant une pluie de feu qui dure fort longtemps. Il semble probable que ces amas rayonnants sont alors formés par voie de condensation au sein de l'atmosphère solaire.

Le nuage le plus extraordinaire que nous ayons jamais vu est celui que nous avons observé le 25 août 1872; le dessin reproduit dans la *fig.* 167 a été exécuté par le P. Ferrari. C'était une flamme immense, complétement isolée, ayant un noyau presque rond, rayonnant dans sa partie supérieure comme un globe incandescent et lançant des filets de haut en bas : on aurait dit une comète embrasée; sa hauteur était d'environ 3 minutes. On l'observa sans relâche pendant trois heures sans constater aucune variation considérable; le lendemain elle existait encore, quoique son volume eût considérablement diminué.

M. Tacchini a observé un grand nombre de nuages lançant de haut en bas des filets semblables à des pluies de feu; le 18 septembre 1873, nous avons étudié avec lui une de ces masses brillantes qui s'était formée à la suite d'une éruption violente; sa forme était celle d'un arc de parabole : l'une des deux branches, la moins élevée, ne cessa de lancer vers la chromosphère une véritable pluie incandescente, pendant que la plus élevée allait en diminuant d'étendue.

Ces masses isolées s'élèvent quelquefois à des hauteurs immenses; nous représentons ici celle du 3 avril 1872 : c'est l'une des plus élevées que nous ayons jamais aperçues. Les *fig.* 168, 169 et 170 montrent avec quelle rapidité ces nuages

se transforment. Voici le résumé de quelques mesures que nous avons prises dans cette circonstance :

Heures d'observation.	Hauteurs.		
h m	"		' "
8.44	259	ou	4.19
8.50	345		5.45
9	372		6.12
9.10	449		7.29
9.15	244		4.40
9.36	traces.		

Il résulte de ces nombres que de $8^h 44^m$ à $9^h 10^m$ la hau-



Fig. 169.

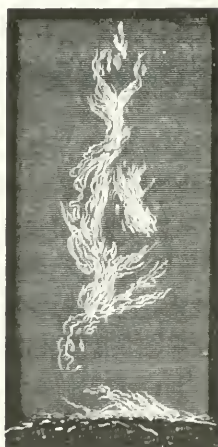
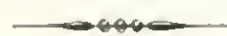


Fig. 170.

teur de cette protubérance s'est accrue de 130 320 kilomètres; ce qui fait une moyenne de $90^{km},5$ par seconde. Sa hauteur maximum était à peu près égale au quart du diamètre solaire.

Nous pourrions citer un grand nombre d'autres exemples : ceux-là suffisent. Du reste, le Chapitre suivant nous fournira l'occasion de compléter la description de ces figures capricieuses.



CHAPITRE III.

ÉRUPTIONS SOLAIRES.

§ I. — *Considérations générales sur les formes des protubérances.*

L'analyse des phénomènes que nous venons d'étudier nous conduit naturellement à diviser les protubérances en trois classes :

1° Les unes sont paisibles et tranquilles, formées par une matière qui est en train de se dissoudre et de se diffuser dans un espace libre, comme la fumée dans notre atmosphère.

2° Une seconde classe possède une structure filamenteuse; la matière qui la compose est évidemment entraînée par une force quelconque : de là ces filets qui s'enchevêtrent les uns dans les autres, à cause des mouvements capricieux auxquels ils sont soumis. Ces masses, dont la structure est filamenteuse, sont quelquefois suspendues dans l'atmosphère solaire sans être reliées avec la couche rose; elles ont alors une grande ressemblance avec les nuages qui flottent dans notre atmosphère, et ces différentes circonstances montrent qu'il existe des courants rapides et énergiques; elles n'autorisent cependant pas l'hypothèse d'un centre éruptif proprement dit.

3° Mais il y a une troisième classe de phénomènes qu'il est impossible d'expliquer sans admettre l'existence d'une force

considérable, dirigée de bas en haut, et qui soulève des masses de matière embrasée; l'existence de cette force ne saurait être révoquée en doute, quelles que soient d'ailleurs sa nature et son origine, qu'elle soit due à la légèreté spécifique des matières qui composent les protubérances ou bien à une force impulsive provenant de l'intérieur même du Soleil. Nous verrons bientôt des protubérances gigantesques pour lesquelles l'intervention d'une force semblable est absolument nécessaire; nous nous contenterons de citer ici, comme exemple, celle que nous avons observée le 12 juillet 1872 au centre d'une tache parvenue au bord du disque. Au milieu d'une masse de flammes très-étendues, on voyait un filet très-mince s'élever à une hauteur de plus de 80 secondes, sans éprouver aucune agitation, absolument comme la fumée d'une chandelle qu'on vient d'éteindre dans un air tranquille; arrivé à cette hauteur, il se ramifiait de manière à former un panache très-délié (*Pl. G*, *fig.* 1). Quelque temps après, le panache commença à se condenser de manière à former un brouillard nébuleux (*Pl. G*, *fig.* 2); il finit par s'évanouir en filets très-fins. Il est impossible d'expliquer ce phénomène sans recourir à une force ascensionnelle très-intense. Ce filet était évidemment lancé de bas en haut, soit par une force de poussée analogue à celle qu'un liquide pesant exerce sur un corps moins dense que lui, soit par une impulsion venant de l'intérieur de la masse solaire. On serait presque tenté de supposer qu'il existe des cratères d'éruption analogues à ceux de nos volcans, s'il était possible d'admettre quelque chose de solide dans un corps comme le Soleil.

Mais, sans aller jusque-là, nous devons nécessairement croire qu'il existe une force éruptive. Une longue expérience nous a montré que les protubérances se divisent nettement en deux catégories : les unes sont calmes et paisibles, leurs

formes persistent pendant longtemps; sans être absolument fixes, elles se transforment assez lentement pour qu'on ne puisse constater ces variations qu'après un temps considérable; elles sont faiblement lumineuses.

Les autres, au contraire, possèdent une vive lumière; elles changent très-rapidement de forme; leur activité très-violente présente des intermittences très-prononcées. Le spectroscope nous a appris que ces deux classes de protubérances présentent des caractères essentiellement différents : les premières ne contiennent que de l'hydrogène et la substance à laquelle appartient la raie D_3 : on trouve dans les autres une quantité de vapeurs métalliques très-diverses, particulièrement celles du sodium, du magnésium, du calcium, du fer, etc. Ce sont ces phénomènes que nous allons étudier maintenant avec un soin tout particulier et en entrant dans les détails que demande l'importance du sujet.

§ II. — *Des éruptions solaires.*

Les éruptions se distinguent des protubérances proprement dites par les caractères suivants :

1° Une lumière extrêmement brillante; aussi arrive-t-il quelquefois que la chromosphère, même en des points qui ne sont pas plus élevés que les autres, se distingue par son vif éclat : elle est alors garnie de pointes droites et roides. Cette vivacité, tout en laissant à la raie C le même indice de réfraction, modifie la couleur des rayons correspondants de manière à lui donner un ton particulier et caractéristique.

2° Dans les éruptions, les mouvements et les changements de forme sont extrêmement rapides; les jets de gaz présentent

la forme de filets minces et nettement tranchés, tandis que dans les autres phénomènes ils présentent un aspect diffus et estompé.

3° La matière est lancée avec une vitesse très-considérable; il en résulte des paraboles et des spirales de formes très-élégantes qu'on ne retrouve pas dans les cas ordinaires.

4° La durée peu considérable et les intermittences qui caractérisent les éruptions contrastent avec la persistance des protubérances proprement dites. Ce sont ces intermittences qui rendent si difficile l'étude des phénomènes éruptifs; elles empêchent souvent de saisir les moments les plus importants et de comprendre les relations qui existent entre les différentes phases qui se succèdent.

5° Les matières éruptives contiennent toujours, outre l'hydrogène et l'hélium, un grand nombre d'autres vapeurs métalliques : la présence ou l'absence de ces vapeurs métalliques fournit donc, à elle seule, un caractère spécifique nettement tranché, qui permet de diviser les phénomènes que nous étudions en deux catégories bien distinctes.

6° Les éruptions de vapeurs métalliques ne se manifestent que dans la région des taches : ce fait est de la plus grande importance, et nous y reviendrons pour l'étudier avec soin. M. Spörer, d'Anclam, est arrivé aux mêmes conclusions que nous; il distingue deux catégories de protubérances, les unes *tranquilles*, les autres *flamboyantes;* ces dernières sont précisément celles qui donnent les spectres des vapeurs métalliques.

Comme il nous est impossible d'établir des lois générales relativement à ces phénomènes, nous suivrons une marche différente; nous présenterons au lecteur l'histoire de quelques-unes des éruptions les plus considérables : on pourra se former ainsi une idée générale des caractères communs à tous

les faits, en faisant abstraction des circonstances infiniment variées que présente chacun d'eux.

L'éruption se manifeste, en général, sur les points où la chromosphère brille d'un plus vif éclat, où elle est recouverte de pointes droites et roides. Les *fig.* 4, 5, 6 (*Pl. E*) représentent les différentes phases d'une même éruption observée le 1er juillet 1871. On voit au point *c* (*fig.* 4) l'aspect que présentait d'abord la chromosphère; d'un amas très-vif s'élançait une belle nappe de jets courts et pleins qui ne tarda pas à s'évanouir; elle était si brillante qu'on pouvait la distinguer à travers les nuages légers qui passaient devant le Soleil. A 3^h38^m, on vit jaillir une nappe très-belle de filets brillants (*fig.* 6); ils disparurent à leur tour, et tout nous paraissait terminé lorsque nous vîmes apparaître les rayons divergents représentés dans la *fig.* 5. Ces rayons étaient parfaitement droits, très-nettement tranchés; l'un d'eux s'allongeait avec une vitesse de 190 kilomètres par seconde, et il atteignit une longueur de $1'25''$, presque six fois le diamètre de la Terre. Les *fig.* 2 et 3 (*Pl. C*) représentent deux autres phases de ce phénomène curieux. Après une série d'alternatives semblables, les jets lumineux changèrent complétement d'aspect ; ils se transformèrent de manière à donner naissance à un nuage diffus sur les bords, et tout fut fini pour ce jour-là. Nous avons fait cette observation avec beaucoup de plaisir; M. Tacchini avait jadis été témoin de faits semblables, mais ils paraissaient tellement extraordinaires que nous sommes heureux de venir appuyer son témoignage par le nôtre.

Les éruptions violentes ne se terminent pas toujours aussi brusquement : elles présentent souvent des formes plus complexes. Une des plus communes est représentée dans la *fig.* 2 (*Pl. B*). C'est une masse semblable à un grand nuage qui

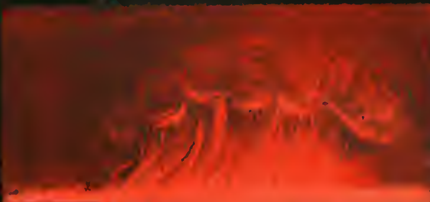
semble soutenu par des colonnes de feu, ou, si l'on aime mieux cette comparaison, un nuage qui laisse tomber une pluie embrasée. Ces masses sont souvent très-vastes, et la figure ne représente que la moitié de celle que nous avons observée ; l'autre moitié s'était dissoute avant que nous eussions pu la dessiner. Les filets qu'on voit à droite sont les restes de cette seconde phase de l'éruption. Une observation attentive nous permit de reconnaître clairement la structure et le mode de formation de ce nuage brillant. Les filets rouges, partis de la chromosphère sous l'influence d'une forte impulsion, demeuraient parfaitement distincts tant que leur vitesse était considérable; arrivés à une certaine hauteur, ils perdaient cette vitesse, s'enroulaient les uns autour des autres, et formaient ainsi des masses arrondies présentant l'apparence d'un vaste cumulus. Au-dessus s'amoncelaient des nuages plus faibles et à peine visibles.

La *fig.* 1 (*Pl. B*) contient des jets incandescents qui s'épanouissent et se diffusent, de manière à former trois étages superposés : la couche supérieure ressemble à une fumée qui se dissout. L'aspect des nuages supérieurs est parfaitement rendu dans la *fig.* 1 (*Pl. C*) qui représente une éruption observée le 13 avril 1870. On y voit clairement deux centres d'action : le principal lance une colonne oblique dont la forme semble bien être la projection d'une courbe hélicoïdale ; une partie de la masse semble retomber, tandis que l'autre continue son mouvement ascensionnel; il en résulte une masse nébuleuse difficile à décrire : sa hauteur totale est de 4'30", c'est-à-dire 139050 kilomètres. Le second jet était moins élevé, mais tout aussi brillant. Cette éruption dura une heure et demie; pendant ce temps les formes changèrent à plusieurs reprises avec beaucoup de rapidité, et enfin tout disparut.

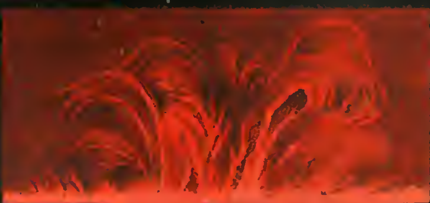

1


2


3


4

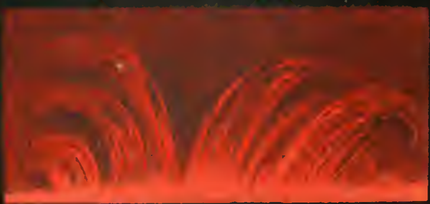

5

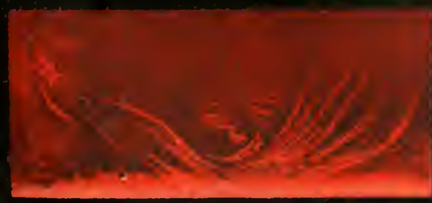

6

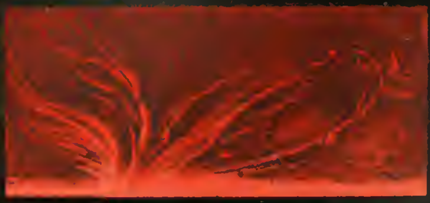

7


8


9


10


11


12

Le 7 juillet 1872, nous avons vu un autre exemple de ces nuages épais autour desquels se groupent les filets lumineux qui produisent l'éruption. A $2^h 50^m$, il n'existait rien à la place où l'éruption devait avoir lieu, si ce n'est un simple jet très-vif, dirigé obliquement : une heure après, tout était changé. Pendant que nous étions occupé à dessiner le bord solaire, une masse énorme avait été lancée à une hauteur de 65 secondes; la *fig.* 4 (*Pl. G*) la représente telle que nous l'avons observée à $3^h 50^m$. A $4^h 15^m$, le nuage avait atteint une hauteur plus considérable, les filets lumineux s'étaient dilatés; ils étaient groupés comme l'indique la *fig.* 5 (*Pl. G*). A $4^h 30^m$, le spectacle était magnifique : la gerbe lumineuse ressemblait à un chapiteau corinthien composé d'un gracieux feuillage retombant avec élégance (*Pl. G, fig.* 6). A $5^h 10^m$, le massif était plus épais et incliné dans un sens opposé au précédent (*Pl. G, fig.* 7). A $5^h 35^m$, les jets lumineux étaient faibles et rares, mais toujours élégamment recourbés (*Pl. G, fig.* 8). A $6^h 50^m$, il ne restait plus que des panaches en partie isolés et suspendus dans l'atmosphère (*Pl. D, fig.* 9). A côté de ces masses lumineuses si mobiles, on observait un éventail composé d'hydrogène qui était complétement immobile. Cette éruption a été observée en même temps par M. Spörer. Si ces masses étaient soulevées par aspiration, et non par une impulsion venant de l'intérieur, comment expliquerait-on cette chute qui se produit au sommet des jets? Mais poursuivons la description des phénomènes que nous avons observés.

La forme des jets lumineux est souvent d'une beauté et d'une élégance qui dépassent toute imagination : ce sont de véritables bouquets de feu d'artifice, des fontaines de feu qui retombent avec grâce en décrivant des courbes paraboliques ou qui s'enroulent sur elles-mêmes en suivant des hélices très-

élancées. Ce qui étonne le plus, ce ne sont pas les jets paraboliques, mais bien ces formes hélicoïdales; il semble qu'on voie rebondir la matière lumineuse qui tendait à retomber : telle est l'éruption du 13 juillet 1872 (*Pl. G. fig.* 10), où l'on voyait les filets se replier nettement sur eux-mêmes. Cette espèce de spirale a été également observée en Amérique par M. Young. Les filets lumineux tournent généralement leur concavité vers le bord du disque solaire; mais le contraire se présente quelquefois : on en voit un exemple dans la *fig.* 11 (*Pl. G*) : c'est une éruption observée le 11 juillet 1872 à $4^h 45^m$: à $6^h 20^m$, elle avait complétement changé de forme (*Pl. G. fig.* 12). C'est au milieu de cet immense incendie que se souleva rapidement la colonne de gaz représentée dans la même *Pl. G* (*fig.* 1, 2, 3).

Nous sommes obligé de nous borner, mais c'est à regret, car nous pourrions utilement publier les nombreux dessins que nous avons exécutés de ces phénomènes si extraordinaires et si intéressants. Nous citerons encore quelques exemples qui sont trop remarquables pour que nous les passions sous silence : le 22 octobre 1872, nous avons observé une éruption dans laquelle les jets lumineux avaient la forme d'une spirale à axe horizontal, bien caractérisée et faisant plusieurs tours : les *fig.* 171, 172 et 173 en représentent les phases successives.

Les mouvements sont immenses et tellement rapides, qu'on n'a pas toujours le temps de faire les dessins. Pour se faire une idée de la vitesse que doit posséder la matière dans ces éruptions, il faut se rappeler qu'un arc de 1 seconde soustend une corde de 715 kilomètres; or on voit souvent, en quelques instants, des transformations s'opérer sur une étendue de deux ou trois minutes, c'est-à-dire de 100000 kilomètres environ. Nous voyons un exemple de ces mouvements

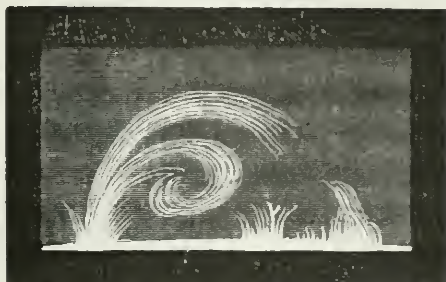
rapides dans l'éruption du 16 octobre 1871, qui a parcouru

Fig. 171.



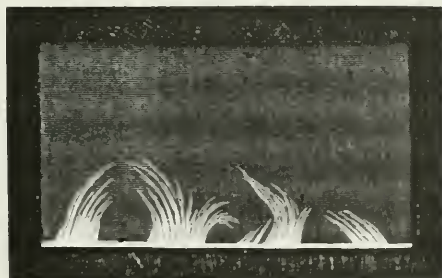
toutes les phases en un temps très-court. Nous l'avons ob-

Fig. 172.



servée et dessinée en présence de M. O. Struve, le célèbre

Fig. 173.



directeur de l'Observatoire de Pulkova (*Pl. II, fig.* 1, 3, 5, 7, 9, 11).

Le 16 octobre 1871, à $9^h 10^m$, la partie occidentale du Soleil ne présentait rien de remarquable; à $9^h 30^m$, il se manifesta une flamme conique très-vive située à l'ouest, à 85 degrés du pôle; près de là, à une distance de 5 degrés environ, il y avait un cumulus large et diffus; à $9^h 36^m$, la flamme avait doublé en hauteur et en largeur : elle semblait avoir absorbé le cumulus dont nous venons de parler.

A $9^h 39^m$, la base continue à se dilater; la hauteur reste la même, 40 secondes environ (*Pl. II, fig.* 1).

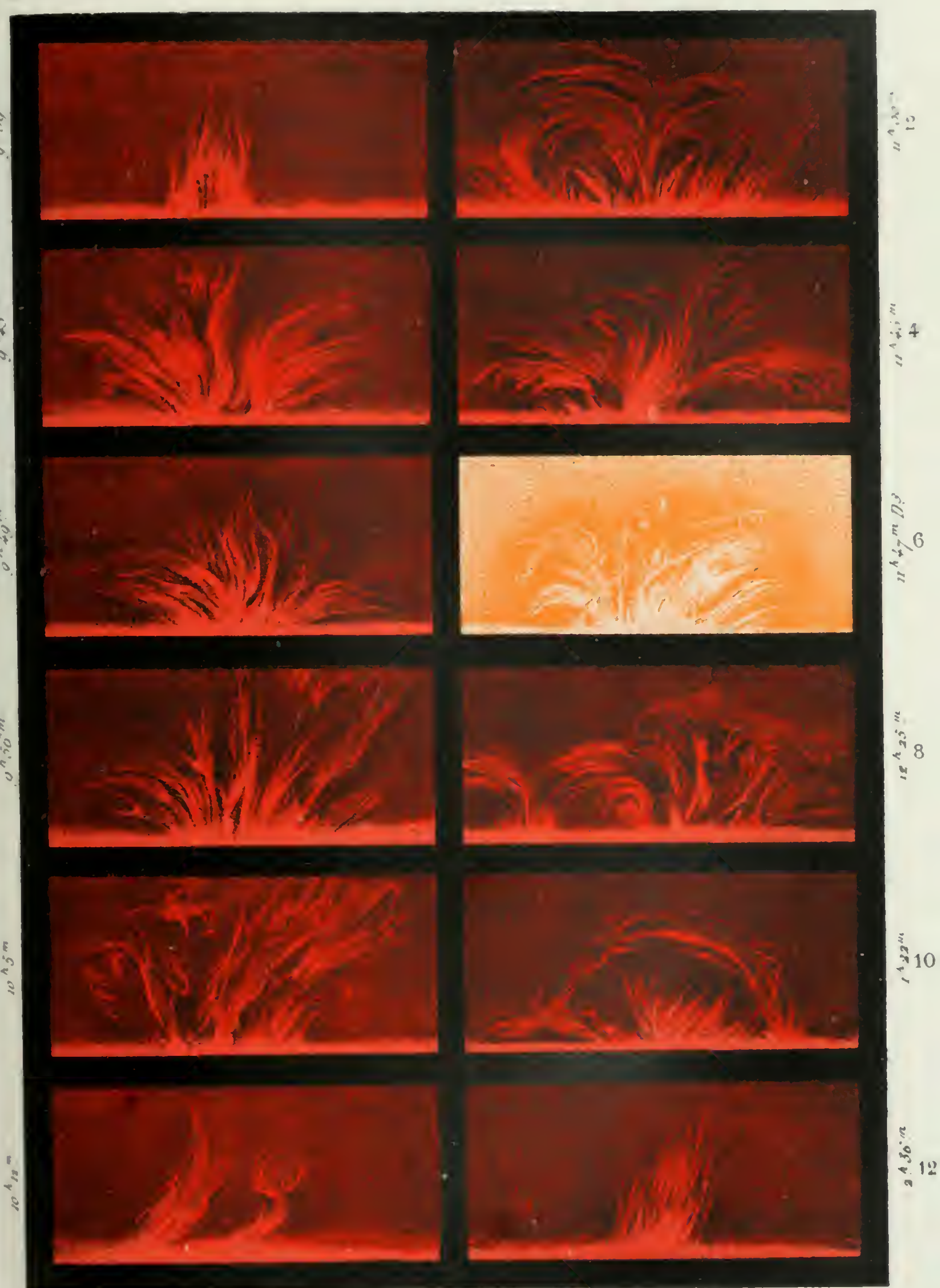
A $9^h 43^m$, tout est changé : la flamme a pris la forme d'un éventail formé de filets très-vifs, terminés à leur sommet par des langues de feu; hauteur : 64 secondes (*Pl. II, fig.* 3).

A $9^h 49^m$, il s'est produit une dilatation très-considérable en largeur et en hauteur (*Pl. II, fig.* 5) : c'est une véritable gerbe de feu d'artifice. On voit à gauche une masse énorme de rayons paraboliques retombant sur le Soleil. Quelques masses brillantes sont suspendues et complétement isolées dans l'atmosphère; elles ressemblent à des fusées qui viennent d'éclater : hauteur totale, 240 secondes; largeur, 236; vitesse d'ascension, 350 kilomètres par seconde. La base, examinée au spectroscope, présente un très-grand nombre de raies renversées : fer, sodium, magnésium, etc.

A $9^h 56^m$, les masses continuent à s'élever, mais la lumière devient plus rare (*Pl. II, fig.* 7). On distingue trois jets principaux. Plusieurs langues de feu, formées par des filets interrompus, restent isolées dans les régions supérieures. La plus grande hauteur du jet vertical est de 176 secondes, dix fois environ le diamètre de la Terre.

A $10^h 5^m$, l'éclat a beaucoup diminué; on voit dans l'atmosphère un grand nombre de masses lumineuses isolées et séparées par des espaces obscurs (*Pl. II, fig.* 9).

A $10^h 12^m$, tout est fini; il ne reste que deux petites



flammes, et il ne se produisit rien de nouveau pendant le reste de la journée.

Les éruptions ne se terminent pas toujours aussi promptement : le plus souvent elles se renouvellent à plusieurs reprises, chaque explosion durant plusieurs heures et étant séparée de la précédente par un intervalle plus ou moins long. C'est là ce qu'on remarque, surtout aux époques de grande activité, lorsqu'une grande tache se présente sur le contour du disque solaire.

Le 19 décembre 1871, il se produisit une autre éruption qui présenta un intérêt tout particulier, c'est qu'on put observer sa forme non-seulement à l'aide de la raie rouge C, mais aussi au moyen de la raie D_3 (*Pl. II, fig.* 2, 4, 6, 8, 10). Les deux méthodes d'observation donnaient des résultats assez différents, comme on peut s'en convaincre en examinant les *fig.* 4 et 6 (*Pl. II*), dessinées presque au même instant ($11^h 45^m$); la première donne l'image observée dans la raie C, la seconde celle que présentait la raie D_3. Nous devons en conclure que la raie D_3 appartient réellement à une substance différente de l'hydrogène. Les figures suivantes (8, 10, 12) montrent les phases successives de l'éruption à $12^h 25^m$, $1^h 22^m$ et $2^h 36^m$. Cette grande éruption se produisit au-dessus d'une tache qui se trouvait alors sur le contour du disque, et qu'on put observer tout entière le lendemain.

Une observation attentive et prolongée nous a appris que les grandes éruptions chargées de vapeurs métalliques se produisent de préférence au-dessus des grandes taches, aux époques de leur plus grande activité, c'est-à-dire lorsqu'elles subissent de grands changements dans leurs formes. Nous pourrions donner des centaines d'exemples à l'appui de cette assertion; contentons-nous de citer la belle tache du 11 juillet 1872; pendant tout le temps qu'elle mit à parcourir la

partie visible du globe solaire, on y remarqua une activité étonnante : les noyaux changeaient rapidement de formes, ainsi que les courants et les facules. Le spectroscope y montrait les raies de l'hydrogène renversées; dans le noyau elles acquéraient un éclat remarquable. Les raies des autres métaux étaient très-élargies, surtout celles du sodium, du magnésium, du chrome, etc. La tache était entourée d'une facule très-vive produisant sur son contour une proéminence brillante.

Lorsque cette tache s'approcha du bord, nous nous occupâmes de l'étudier avec soin. A peine la facule touchait-elle le contour, qu'il se produisit des protubérances et des éruptions très-vives : elles occupaient toute la région de la tache et de la facule, et il est très-difficile de dire en quels points se trouvaient les centres d'action. Ce qu'il y eut de plus extraordinaire, c'est que ces éruptions se renouvelaient après des intervalles de cinq ou six heures, et qu'elles paraissaient s'allumer d'un côté, lorsqu'elles s'éteignaient de l'autre. Le 11 juillet, nous fûmes frappé d'une particularité assez singulière que présentait la forme des jets lumineux (*Pl. G*, *fig.* 11 et 12). Ils tournaient vers le globe solaire non leur concavité, mais leur convexité, comme si un souffle puissant, agissant de haut en bas, éparpillait un courant gazeux au moment où il sort d'un cratère qui le lance avec force : au lieu d'une aspiration de bas en haut, il faudrait donc admettre l'existence d'une pression agissant de haut en bas!

Dans l'impossibilité où nous sommes de rapporter ici un plus grand nombre de dessins, nous renvoyons le lecteur aux publications de MM. Tacchini, Respighi, Zöllner, Young, ainsi qu'à nos propres Mémoires et à ceux des autres spectroscopistes; ils y trouveront des détails nombreux, intéressants et instructifs sur ces admirables phénomènes. Si nous

avons donné la préférence à nos propres observations, c'est que, malgré les nombreuses publications qui ont été faites jusqu'à présent, nous n'avons trouvé nulle part des séries complètes et comparables dans lesquelles ces figures fussent disposées d'une manière systématique pour l'instruction du lecteur et tracées d'après une même méthode de représentation graphique.

§ III. — *Conclusions résultant des observations précédentes.*

Les détails que nous avons exposés dans le paragraphe précédent ne sont pas seulement de nature à satisfaire la curiosité de l'esprit : ils doivent encore nous conduire à des conclusions que nous allons exposer maintenant.

1° Les matières qui produisent le phénomène des protubérances sont généralement des gaz incandescents soulevés vers les régions supérieures par des forces dont l'origine ne nous est pas clairement connue. Ces mouvements sont-ils le résultat de la légèreté spécifique de la matière lumineuse, ou bien faut-il les attribuer à une force impulsive provenant de l'intérieur du globe solaire? Nous ne saurions le dire, mais nous n'en avons pas moins le droit d'employer le mot *éruption* pour désigner les phénomènes qui nous occupent. Si M. Faye déclare qu'il n'y a rien dans les faits observés qui justifie cette expression, c'est qu'il n'a jamais observé de ses propres yeux ce que nous avons vu tant de fois, et, s'il va jusqu'à dire que toutes les circonstances de ces phénomènes sont en contradiction avec le sens naturel du mot que nous employons, c'est qu'il se laisse influencer par des préoccupations théoriques inconciliables avec les faits que nous avons habituellement sous les yeux. Nous avons la certitude que, s'il faisait

quelques observations personnelles, il changerait complétement d'opinion : c'est ce qui est déjà arrivé pour les protubérances, qu'on regardait d'abord comme une illusion d'optique produite par un mirage [1]. Sans doute, la simple inspection d'un phénomène ne doit pas nous amener immédiatement à des conclusions qui seraient prématurées; on ne doit pas confondre la *description* d'un fait avec la théorie qui en donne l'explication : mais ici les phénomènes nous paraissent tellement clairs, leur explication est si évidente, que nous ne pourrions pas même énoncer les faits tels qu'ils se présentent à nos yeux sans employer le mot que nous avons adopté, suivant en cela l'exemple d'un grand nombre de savants qui s'occupent de la même question.

2° La matiere n'est pas simplement lancée en ligne droite, elle est aussi animée de mouvements tourbillonnaires, ce qui donne aux jets lumineux l'apparence de spirales dont les axes prennent toutes les positions, depuis la verticale jusqu'à l'horizontale. Ces mouvements tourbillonnaires, surtout ceux dont l'axe est horizontal, doivent nécessairement résulter d'une force éruptive combinée avec des courants violents dirigés normalement à la force ascendante. Nous avons déjà fait remarquer qu'une simple aspiration ne peut expliquer les phénomènes que nous venons de décrire.

3° Arrivées à une certaine hauteur, les masses lumineuses changent d'aspect : elles se mélangent et se confondent, perdant ainsi l'aspect filiforme pour prendre une apparence nébuleuse, comme une fumée qui s'évanouit dans l'air; elles continuent à monter, mais elles se diffusent progressivement et finissent par s'évanouir. Nous devons en conclure que ces

---

[1] *Voir* les *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, 31 octobre 1859, t. XLIX, p. 596.

mouvements s'accomplissent dans un milieu résistant; il est probable que, dans ce cas, la force motrice est uniquement due à la légèreté spécifique des fluides, tandis que les phénomènes qui présentent d'autres apparences supposent en outre une force d'impulsion d'origine différente.

Le milieu résistant dont nous venons de parler, c'est l'atmosphère solaire. Nous avions déjà affirmé l'existence de cette atmosphère; nous avions dit qu'elle doit avoir une élévation suffisante pour expliquer l'existence des masses lumineuses qui sont suspendues et isolées dans l'espace; nous avions assigné comme limite inférieure cinq ou six minutes, c'est-à-dire 214500 ou 257000 kilomètres : pour satisfaire aux observations que nous avons citées à la fin du paragraphe précédent, nous devons aller jusqu'à 7′30″, ce qui fait, en nombre rond, la moitié du rayon solaire. L'observation des éclipses a vérifié l'exactitude de cette conclusion : l'auréole d'hydrogène observée dans ces circonstances résulte manifestement de la dissolution du gaz provenant des protubérances : sa hauteur atteint au moins un quart du diamètre solaire.

4° Les protubérances sont généralement composées de jets filiformes : il faut donc supposer que ces filets lumineux sont soumis à une force d'expansion; mais il n'est pas nécessaire d'admettre, comme on l'a fait, qu'ils sont lancés par des orifices percés dans des parois résistantes, solides ou liquides. On voit souvent, dans notre atmosphère, des nuages ayant la même structure, sans qu'on puisse expliquer ainsi leur formation; dans l'atmosphère solaire, on aperçoit des nuages isolés, complétement détachés de la chromosphère, ayant également la structure filamenteuse : ceux-là, du moins, n'ont pas dû être lancés à travers un orifice, et, par conséquent, cette hypothèse purement gratuite doit être rejetée comme inutile.

Du reste, si l'on réfléchit aux dimensions de ces filets lumineux, on verra bien qu'il est inutile de supposer un orifice résistant pour les circonscrire. Une masse d'huile volatile produit en brûlant une colonne de fumée limitée à sa base par l'étendue de la masse en ignition; les filets peuvent de même être limités par l'étendue de la masse incandescente qui les produit. Les plus minces ont une épaisseur de 200 ou 300 kilomètres; quelques-uns ont une épaisseur égale à 4, 5 et même 10 fois le diamètre de la Terre, c'est-à-dire 120000 kilomètres environ.

5° Quant à la matière qui compose principalement les masses protubérantielles, c'est l'hydrogène qu'on trouve au-dessus de la chromosphère en très-grande quantité, mélangé avec la substance de la raie D_3. Ici se présente naturellement une question de la plus haute importance : l'hydrogène qui se dégage ainsi dans les éruptions provient-il de la masse intérieure du Soleil? Dans le cas où l'on répondrait affirmativement, voici deux conséquences que l'on ne saurait éviter : la masse intérieure doit s'épuiser, et, de plus, l'atmosphère doit s'accroître indéfiniment par l'accumulation du gaz, qui ne cesse d'y arriver de toutes parts. En effet, la longue suite de nos observations nous a appris que, aux époques de grande activité, on voit, en moyenne, douze ou treize centres d'action chaque jour; en tenant compte de la rotation solaire, il y a, en vingt-quatre heures, un quatorzième de la surface du globe solaire qui se présente sur le contour du disque; nous pouvons donc dire qu'il y a constamment un grand nombre de centres d'éruption, deux cents au moins, en pleine activité sur la surface du Soleil. C'est donc une masse énorme d'hydrogène qui s'échapperait ainsi sans relâche; il est évident que la masse intérieure finirait par s'épuiser à la longue, et les conditions physiques de l'astre se trouveraient modifiées

d'une manière sensible dans un temps relativement assez court.

On a répondu à cette objection en mettant en avant la masse énorme de la matière solaire; l'hydrogène s'y trouve soumis à une pression extrêmement grande, il y occupe un espace considérable; il pourra donc suffire pendant des milliers et des millions de siècles aux éruptions dont nous sommes témoins; il s'épuisera sans doute, mais cet épuisement ne se produira qu'à une époque très-reculée, ce qui n'a rien d'invraisemblable.

Cette réponse n'est cependant pas satisfaisante, car elle ne résout qu'une partie de la difficulté. Même en admettant qu'il y ait dans l'intérieur du globe solaire une source presque inépuisable d'hydrogène, nous devons nous préoccuper de l'influence que pourrait avoir le gaz qui s'échappe constamment de l'intérieur à l'extérieur; il doit évidemment s'accumuler dans l'atmosphère solaire en quantité assez grande pour s'accroître d'une manière appréciable dans un temps assez court. Et cependant, à en juger par l'auréole qu'on observe pendant les éclipses et par l'ensemble des apparences que présente le Soleil, il paraît certain que la constitution de cet astre ne s'est pas modifiée depuis un ou deux siècles. Nous allons même plus loin, et nous ne craignons pas d'affirmer que, d'après l'influence générale qu'il exerce sur la Terre, il est demeuré dans les mêmes conditions pendant toute la période historique.

Il y a deux manières d'échapper à ces contradictions et à ces difficultés : 1° il faudrait admettre que les éruptions ne sont que de simples soulèvements de la masse chromosphérique, des changements de niveau des couches superficielles, ces mêmes matières retombant de nouveau sur le Soleil, après avoir acquis, par le refroidissement, une densité plus consi-

dérable; 2° on pourrait encore expliquer le même phénomène par la dissociation d'un composé chimique résultant de la combinaison de l'hydrogène avec quelque substance inconnue, peut-être celle qui donne la raie D_3. Ces substances, un instant séparées, pourraient se combiner de nouveau, après s'être refroidies dans les hautes régions, et retomber ensuite vers le Soleil.

Il nous est impossible de dire laquelle de ces deux hypothèses doit être préférée, car nous ne connaissons aucun fait décisif : aussi reste-t-il des savants qui continuent à admettre l'opinion de l'émission indéfinie. Ils répondent aux objections que nous venons de signaler en disant que l'hydrogène, au lieu de s'accumuler dans l'atmosphère du Soleil, se diffuse incessamment dans les espaces planétaires; ils ajoutent que c'est peut-être là qu'il faut chercher la cause des aurores boréales et de la lumière zodiacale. Mais il y a à tout cela des difficultés très-grandes, de véritables impossibilités : 1° Le spectre de l'aurore boréale et celui de la lumière zodiacale ne sont pas les mêmes et ils diffèrent de celui de l'hydrogène; on ne doit donc pas prétendre qu'on a trouvé la véritable explication de ces phénomènes et se servir, comme on l'a fait, de cette prétendue explication pour démontrer l'hypothèse sur laquelle elle repose. Tout au plus pourrait-on dire que l'hydrogène ainsi répandu dans les espaces planétaires, trop refroidi pour être lumineux par lui-même, est faiblement illuminé par la réflexion des rayons solaires ; mais alors ce phénomène devrait se produire dans toutes les directions, et l'on sait qu'il n'en est pas ainsi pour la lumière zodiacale. 2° D'ailleurs cette émission indéfinie diminuerait constamment la masse du Soleil, et cette diminution devrait, avec le temps, exercer une influence sensible sur le mouvement des corps célestes : les astronomes n'ont rien remarqué de sem-

blable. On a prétendu, il est vrai, que la chute des météorites vient constamment accroître la masse du Soleil; mais cette compensation à laquelle on a recours est au moins très-incertaine.

On nous permettra sans doute de faire connaître notre opinion et de donner les raisons de notre préférence. Dans toutes les actions de la nature, il y a une source de compensation qui tend à maintenir l'équilibre au milieu du mouvement; il doit en être ainsi dans les phénomènes qui se passent sur le Soleil, et en particulier dans les éruptions qui nous occupent en ce moment : aussi croyons-nous probable la première des deux hypothèses que nous venons d'indiquer, hypothèse d'après laquelle il y aurait une simple circulation d'hydrogène que des variations successives de température amèneraient dans les régions supérieures pour le laisser retomber ensuite. Bien souvent nous voyons les matières éruptives, encore incandescentes, retomber vers le Soleil; à plus forte raison ce mouvement devra-t-il se produire lorsque la température sera considérablement abaissée. Or, d'après nos observations, l'hydrogène s'élève à une hauteur de 6 ou 7 minutes, quelquefois davantage; alors on voit sa lumière diminuer et s'éteindre, quelquefois très-vite : c'est donc qu'il se refroidit, il devient plus dense, et il est bien plus naturel de penser qu'il redescend vers les régions d'où il est sorti.

Les protubérances ont sans doute une hauteur variable; mais il résulte de nos observations que les parties les plus brillantes ne dépassent jamais 200 ou 250 secondes. Au-dessus, on ne voit plus que des matières nuageuses et diffuses qui doivent être extrêmement raréfiées: on ne retrouve plus la structure filaire avec ses masses compactes et ses formes nettement tranchées. On peut donc assurer que les flammes proprement dites ne s'élèvent jamais au-dessus de la

limite que nous venons d'indiquer; au-dessus des flammes se trouvent les nuages occupant une étendue à peu près égale, de sorte que la matière rouge ne s'étend pas au delà de 400 ou 500 secondes. Les protubérances composées sont celles qui atteignent la plus grande élévation; leur hauteur est, en moyenne, égale à la moitié de leur base. Un jet isolé dépasse rarement 90 secondes. Ajoutons à cela une remarque fondée sur des observations que nous allons bientôt citer. Les protubérances et les éruptions varient périodiquement, et leur période coïncide à très-peu de chose près avec celle des taches. Si donc, dans la période d'activité, l'atmosphère solaire se dilate, il est possible que, dans la période de calme, elle reprenne ses dimensions primitives. En ce moment (août 1875), la chromosphère est très-basse, les éruptions métalliques très-rares, les protubérances proprement dites peu nombreuses. Nous voilà donc à une époque où les matières, qui étaient naguère lancées à une grande distance du Soleil, se trouvent concentrées dans un espace plus restreint. Pendant l'éclipse du mois d'avril 1875, d'après les relations qui nous sont parvenues, la couronne et les protubérances avaient une étendue peu considérable.

§ IV. — *Vitesse de formation des protubérances.*

La rapidité avec laquelle se produisent les mouvements et les transformations que nous venons de décrire est extrêmement variable; afin de la faire mieux comprendre, nous allons apporter quelques exemples et décrire quelques-unes de nos observations.

Le 26 mai 1871, nous avions sous les yeux une masse nébuleuse ayant une hauteur de 1′30″; une heure et demie plus

tard sa hauteur était devenue double, ce qui suppose une vitesse d'environ 12 kilomètres par seconde. C'est bien peu de chose, et le mouvement n'était sans doute produit que par la légèreté spécifique de la matière incandescente. Nous avons bien souvent observé des vitesses de 60, 80 et même 100 kilomètres par seconde. Une seule fois nous avons vu un mouvement de 250 kilomètres; l'éruption du 16 octobre 1871 fut plus rapide encore, puisqu'elle nous donna une vitesse moyenne de 370 kilomètres. M. Young a été témoin de phénomènes semblables, il a étudié des mouvements de 200 et même 300 kilomètres par seconde. Le nuage que nous avons observé le 3 avril 1873 est le plus élevé que nous ayons jamais vu; il montait avec une vitesse de 90 kilomètres.

L'éruption observée par M. Young se serait élevée de 413 kilomètres par seconde si elle n'avait pas éprouvé de résistance de la part du milieu qui l'environnait (1); mais il faut bien distinguer la vitesse initiale avec laquelle la matière incandescente est lancée du globe solaire et la rapidité avec laquelle elle s'élève ensuite. Nous parlerons plus tard de la vitesse initiale : ce que nous observons directement, c'est le temps qu'une éruption met à se développer et l'étendue qu'elle occupe alors; nous en concluons la vitesse moyenne de sa propagation : c'est de cette vitesse moyenne que nous voulons parler en ce moment, et nous allons essayer d'en donner une idée par quelques exemples.

Le 17 avril 1871, à $11^h 50^m$, nous observions, sur le bord sud-ouest du Soleil, un groupe de facules très-vives, et, au milieu de ce groupe, une tache sur le point de passer dans l'autre hémisphère. Au-dessus des facules, brillait un amas

---

(1) *Monthly Notices R. A. Soc.*, décembre 1871, t. XXX, p. 50.

de jets lumineux ayant une hauteur de 1 minute environ; il était dirigé obliquement et couronné par un amas de nuages assez peu étendu. Au bout de quelques minutes, ce jet devint plus brillant; à midi précis, son sommet s'inclina vers la gauche, tandis que la base conservait la direction indiquée dans la *fig.* 1 (*Pl. C*). Au-dessus, nous vîmes une masse nébuleuse se développer avec une rapidité effrayante. A midi 15 minutes, il se forma sur la gauche un second jet dont il n'existait aucune trace auparavant; il donnait naissance à des nuages qui semblaient le réunir au précédent, mais il était facile de reconnaître qu'ils étaient indépendants l'un de l'autre. Le jet principal se développait toujours; il était couronné par une espèce de chevelure qui se développait sans cesse, formant un immense arc parabolique, ou plutôt spiral, qui recouvrait en entier le jet secondaire; sa partie supérieure était dominée par une masse énorme de nuages qu'il est impossible de décrire et dont la forme se modifiait d'une manière continue; leur hauteur était d'environ 4 minutes, mais leur contour supérieur n'était pas nettement tranché; leur vitesse était d'environ 143 kilomètres par seconde. Nous fîmes rapidement un croquis, mais il était impossible de terminer aucun dessin, car c'était un véritable changement à vue. A midi 30 minutes, tout était fini; on ne voyait plus que quelques flammes aux endroits d'où avaient jailli ces jets enflammés. Nous continuâmes nos observations d'une manière attentive jusqu'à 4 heures, mais sans rien voir qui ressemblât à ce magnifique feu d'artifice.

On voit, par cet exemple, qu'il ne faut point regarder comme des exagérations les descriptions pompeuses des observateurs, quoiqu'elles puissent nous surprendre par les dimensions étonnantes des phénomènes et par la rapidité avec laquelle se produisent les changements de forme. Dès les dé-

buts, M. Lockyer observa des vitesses de 300 à 400 kilomètres; M. Respighi assure avoir observé des vitesses initiales de 600 à 700 et même 800 kilomètres [1]. M. Tacchini les évalue à 300 kilomètres. Il faut bien reconnaître que les éruptions ne présentent pas souvent une aussi grande étendue; on peut bien supposer aussi que les mesures ne sont pas irréprochables au point de vue de la précision. Nous n'hésitons cependant pas à admettre que ces nombres ne s'écartent pas beaucoup de la vérité : ce que nous avons vu suffit pour nous faire comprendre qu'il n'y a là rien d'impossible ou d'invraisemblable.

MM. Lockyer et Respighi, parlant des phénomènes qu'ils ont observés, les comparent à des explosions qui se succéderaient à de courts intervalles. Quelquefois même ils parlent de *bombes* [2] et de *détonations*. Ces expressions ont sans doute échappé à la surprise du premier instant, et elles ont été inspirées par la comparaison, qui se présente naturellement à l'esprit, entre les éruptions solaires et les phénomènes que présentent nos volcans; mais, quelque extraordinaires que puissent paraître les expressions employées par les observateurs, elles nous montrent avec certitude que les actions mécaniques dont ils ont vu les manifestations sont d'une violence incomparable.

Il ne faut cependant pas se hâter d'admettre sans contrôle certaines vitesses exorbitantes. Un corps, lancé de bas en haut avec une vitesse initiale de 612 kilomètres, s'éloignerait indéfiniment du Soleil; il sortirait de sa sphère d'attraction

---

[1] *Mem. sulle protub. solari* (*Atti dell' Ac. R. dei Lincei*, 1871, p. 71, § III). Ces nombres ont cependant besoin d'être confirmés.

[2] Sous ce nom de *bombes*, ils désignent sans doute des masses de jets incandescents qui restent pendant quelque temps comme suspendus dans l'atmosphère avant de se dissoudre.

avant que sa vitesse soit nulle et ne retomberait jamais vers lui. Des explosions capables d'imprimer aux corps des vitesses de 600 à 800 kilomètres produiraient donc une diffusion de la matière solaire dans les espaces planétaires. Il est vrai que ces explosions n'ont pas lieu dans le vide : la résistance de l'atmosphère du Soleil diminue constamment la vitesse et peut, dans certaines circonstances, empêcher la diffusion dont nous parlons. Mais la densité de cette atmosphère n'est pas très-considérable; si la vitesse initiale était réellement de 800 kilomètres, la résistance ne suffirait pas pour empêcher la matière de sortir en dehors de la sphère d'attraction et de se répandre dans l'espace [1]. Nous attendrons donc de nouvelles observations pour regarder comme certaines ces vitesses extraordinaires.

§ V. — *Comparaison entre les figures spectrales des protubérances et celles qu'on observe directement pendant les éclipses.*

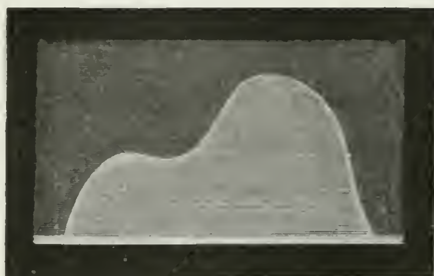
On peut se demander si les dessins que nous faisons, pour représenter les protubérances telles que nous les montre le spectroscope, représentent également les formes que nous offriraient les mêmes protubérances, si nous pouvions les observer directement, comme nous le faisons pendant les éclipses. Cette question fut mise à l'ordre du jour à l'occasion de l'éclipse de 1870; le mauvais état du ciel nous empêcha de faire une observation concluante, mais la ressemblance nous parut suffisamment justifiée.

---

[1] *Voir* les travaux de M. Proctor, *Monthly Notices R. A. Soc.*

M. Tacchini, à Terranova, put faire une comparaison exacte : pendant la totalité, il observa une protubérance dans sa lunette; puis, après l'éclipse, il l'observa de nouveau au spectroscope, et il trouva que l'observation spectrale ne fait voir que la partie centrale la plus brillante. La *fig.* 174 représente la protu-

Fig. 174.



bérance telle qu'on la voyait pendant l'éclipse; la *fig.* 175

Fig. 175.



montre la même protubérance observée ensuite au spectroscope (¹) : la première différerait très-peu de la seconde si on l'examinait à travers un milieu nébuleux, et cependant M. Tacchini employait un spectroscope peu puissant. Dans

(¹) Voir *Rapporti dell' eclisse del* 1870, tav. V.

son expédition aux Indes, M. Lockyer a trouvé une ressemblance absolue, il dit même parfaite, entre les deux apparences. Tous les observateurs s'accordent cependant à dire que, pendant les éclipses, les couleurs sont plus brillantes et plus belles : c'est qu'alors l'œil reçoit la lumière telle que l'envoie l'objet observé, tandis que le spectroscope sépare les différentes couleurs et produit autant d'images différentes, dont chacune est nécessairement moins lumineuse et moins bien harmonisée. De plus, le vif éclat dont brillent les protubérances pendant les éclipses peut bien empêcher d'apercevoir les parties moins lumineuses.

Une autre question se présente encore : les différents observateurs voient-ils dans leurs spectroscopes des formes identiques, ou bien y a-t-il dans ces formes observées quelque chose de personnel et de subjectif? Pour résoudre cette question, nous nous sommes entendu avec M. Tacchini, de Palerme, et M. Lorenzoni, de Padoue, afin de faire des observations simultanées. Le résultat de ces observations a été publié dans les *Pl. III* et *IV* des *Mémoires de la Société des Spectroscopistes italiens*, 1re année, 1872 : nous avons prouvé que les figures faites au même instant sont identiques quant à la partie essentielle ; il n'y a de différence que dans les détails, et encore ces différences sont comparables à celles que l'on trouverait dans les dessins exécutés par plusieurs observateurs d'un nuage ou d'un autre objet ayant des formes indécises et des contours mal terminés. La plus grande différence provient de l'habileté plus ou moins grande dans l'art du dessin et de la *manière* particulière de chacun. On peut donc avoir la certitude que les protubérances sont les mêmes pour tous les observateurs, quant à leur forme générale et à leurs parties essentielles.

La puissance de l'instrument n'est pas étrangère aux diffé-

rences qui existent dans les détails. Une protubérance que l'on voit nette et distincte avec un faible grossissement perd son relief et sa netteté lorsqu'on grossit davantage : c'est là surtout que se trouve la cause des différences qui existent entre les figures de M. Tacchini et les nôtres. Une lunette plus faible ne fera voir que le jet principal, qui sera brillant et présentera une forme nettement accusée ; une lunette grossissant davantage fera voir les masses peu lumineuses qui environnent l'objet principal, et l'ensemble possédera un aspect nébuleux assez différent du précédent. C'est ainsi que les taches peuvent être observées avec toutes les lunettes ; mais il n'y a que les grandes qui fassent voir les plus petits détails. Il n'en est pas moins vrai que la forme générale d'une protubérance est connue avec certitude et est dessinée d'une manière exacte, quel que soit le spectroscope qu'on emploie à cet usage.

Nous terminerons ce Chapitre par une réflexion importante. Nous avons vu que la durée des éruptions est comparativement très-courte, que les protubérances elles-mêmes sont très-variables. Tout cela nous montre que, malgré l'assiduité et la persévérance des observateurs, nous ne parvenons à connaître qu'une très-petite partie des phénomènes qui se passent à la surface du Soleil. Si les plus habiles parviennent à enregistrer un certain nombre de faits, la multitude de phénomènes qui échappent à leur attention est infiniment plus considérable. C'est pour cela que nous avons engagé plusieurs savants italiens à s'entendre pour faire ces observations d'une manière systématique : c'est le seul moyen de découvrir les lois que nous cherchons à connaître. La Société des spectroscopistes italiens qui s'est formée nous déchargera, espérons-le, de la lourde tâche que nous nous étions imposée, de surveiller journellement le contour du disque solaire : cette étude est

bien plus pénible que celle des taches, et cependant nous ne l'avons pas interrompue depuis le 23 avril 1871 jusqu'à l'époque actuelle (janvier 1876). Nous sommes heureux de pouvoir ajouter que le nombre des observateurs s'accroît constamment. Le P. Lafont vient d'ériger à Calcutta un observatoire destiné à l'observation du Soleil, et plus spécialement à l'étude des protubérances. A Potsdam, à Oxford et en Amérique, il y a déjà des observatoires semblables, et bientôt nous n'aurons plus rien à désirer sous ce rapport.

Conclusion.

Les phénomènes que nous venons de décrire sont incontestablement des éruptions, dans le sens naturel de ce mot : nous ne saurions en douter à la manière dont les masses incandescentes sont lancées dans l'atmosphère solaire. Mais ces mouvements sont-ils dus à une poussée, ou faut-il les attribuer à une aspiration? Ce n'est pas à nos yeux qu'il faut demander la réponse à cette question importante; nous ne pouvons la résoudre qu'en réfléchissant et en raisonnant sur l'ensemble des faits, en comparant ces phénomènes d'éruption avec ce que nous avons appris dans l'étude attentive des taches solaires. Nous renverrons donc la solution définitive à un autre Chapitre; mais il nous paraît évident, dès maintenant, que la plupart des circonstances qui entourent ces phénomènes nous conduisent à l'hypothèse d'une poussée venant de l'intérieur plutôt qu'à une force d'aspiration que nous ne saurions expliquer d'une manière satisfaisante.

CHAPITRE IV.

ANALYSE SPECTRALE DES PROTUBÉRANCES EN DEHORS DES ÉCLIPSES.

§ 1. — *Raies observées dans les protubérances.*

Nous avons appris déjà, par les observations faites durant les éclipses, que les protubérances sont en grande partie composées d'hydrogène. Dans ses observations de 1868, M. Rayet a constaté que plusieurs autres substances entrent dans leur composition. Après la découverte capitale faite par M. Janssen, on se mit bien vite à rechercher et à étudier ces autres raies en plein soleil. Nous allons faire connaître, dans ce Chapitre, les conclusions les plus importantes auxquelles on ne tarda pas à arriver.

Les différentes raies de l'hydrogène ne sont pas également faciles à voir; il en est deux qui sont toujours visibles : $H\alpha = C$, $H\beta = F$. Il est difficile de voir la troisième, $H\gamma = 2793,5 K$, près de G, dans le bleu foncé, et surtout la quatrième, $H\delta = 3363,5 K$. D'après une remarque de M. Lockyer, ces deux dernières raies n'existent que quand le gaz est porté à une température très-élevée; donc, lorsqu'on ne les aperçoit pas, cela peut tenir à une température relativement basse. Il faut cependant se tenir en garde contre des conclusions trop précipitées, car on s'exposerait à mal interpréter un fait purement négatif. M. Lorenzoni a montré que, si l'on veut observer avec exactitude les raies les plus réfrangibles, il faut éviter un pouvoir dispersif trop considérable et

mettre la lunette au point d'une manière toute spéciale pour ce cas particulier. On sait en effet que, dans les meilleures lunettes achromatiques, le foyer optique n'est pas le même pour tous les rayons; l'achromatisme n'existe que pour les couleurs qui contribuent le plus à la vision, et les rayons les plus réfrangibles ne sont pas rigoureusement compensés : il faut donc mettre exactement l'image solaire au foyer propre à chaque raie, si l'on veut la voir avec netteté. En opérant ainsi, M. Lorenzoni a réussi à voir, sur tout le contour du disque solaire, la quatrième raie $H\gamma$; il en a même vu une cinquième qu'il a appelée *f*, et qui correspond à la longueur d'onde 4584 (Angström). Il a remarqué que cette raie, peu visible dans le voisinage des pôles, était plus facile à observer dans les régions équatoriales et auprès des taches [1].

Outre les raies de l'hydrogène, on voit toujours la raie jaune D_3, qu'on avait d'abord confondue avec celle du sodium, mais qui est notablement plus réfrangible. En observant avec un puissant spectroscope de Merz, nous avons trouvé que, si nous prenons pour unité la distance entre D_1 et D_2, celle de D_2 à D_3 sera égale à 2,06. Cette raie n'appartient pas à l'hydrogène : on l'a inutilement cherchée dans le spectre de ce gaz, en opérant à toutes les températures et à toutes les pressions que l'on peut obtenir; on est donc en droit de penser qu'elle est due à une autre substance. Nous devons cependant signaler deux circonstances importantes : 1° on observe cette raie toutes les fois qu'on trouve dans les protubérances le spectre de l'hydrogène; il semble donc bien difficile d'admettre que la substance qui la produit n'ait aucun rapport avec ce gaz; 2° le spectre normal ne

---

[1] *Voir* les *Mémoires des spectroscopistes italiens*, 1872, p. 9 et suiv.

contient aucune raie noire correspondant à cette position D_3. Ce fait est très-grave, et on le regarde comme inexplicable dans la théorie de Kirchhoff. M. Huggins a cru apercevoir une faible ligne noire occupant la même position dans le spectre direct; mais il avoue lui-même que ce phénomène n'est pas constant et que, à la place de la raie noire, il a quelquefois observé une ligne brillante. Nous avons aussi constaté plus d'une fois l'existence de cette ligne brillante, mais elle nous a toujours paru très-faible. Dans tous les cas, la ligne noire, telle qu'on l'a observée dans le spectre direct, n'a jamais présenté une intensité comparable à celle de la raie brillante qu'on trouve dans le spectre des protubérances, et cette circonstance suffit pour nous faire établir une différence entre les deux phénomènes. En disposant la fente du spectroscope tangentiellement au disque solaire, nous avons remarqué, à la base de la raie D_3, une raie noire semblable à celle qu'on observe en C. Cette raie noire semble due à l'absorption que la chromosphère exerce sur sa propre lumière; de plus elle coïncide avec une autre raie qui est produite par l'atmosphère terrestre lorsque le Soleil est près de l'horizon.

D'après M. d'Arrest, les longueurs d'onde correspondant à D_3. C et F donneraient la relation suivante : $D_3 = \frac{1}{3}(2C + F)$. Nous croyons pouvoir douter de l'exactitude de cette équation, car la longueur d'onde employée par M. d'Arrest pour D_3 ne s'accorde pas avec nos mesures; mais, si nous sommes dans l'erreur, si la relation que nous venons de citer est exacte, on pourrait penser que cette raie est due à un phénomène d'onde résultant de deux autres. Ainsi se trouverait résolue l'objection contre la théorie de Kirchhoff, objection tirée de ce fait, que la raie D_3 ne se renverse pas dans le spectre direct. D'ailleurs, ce fait pourrait s'expliquer d'une autre manière : il suffit d'admettre que la substance qui produit cette raie est

assez légère pour s'élever au-dessus des autres, et en même temps qu'elle est en trop petite quantité pour former une couche absorbante capable de produire le renversement.

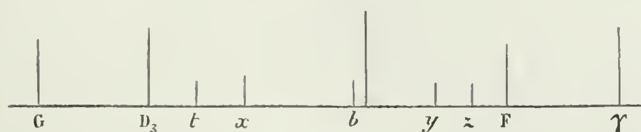
Mais des observations postérieures nous ont convaincu que cette raie appartient bien à une substance spéciale. La hauteur de la raie D_3 n'est pas toujours exactement proportionnelle à celle de C et de F, et même Donati, dans l'éclipse de 1870, a trouvé qu'elle était plus élevée que les deux autres. En 1860, les protubérances nous ont paru couronnées de jaune, et M. de la Rue a fait la même remarque. Il est facile de constater, dans les observations spectrales, que cette raie n'a pas toujours la même intensité relative; les gerbes des éruptions présentent en C et en F des lignes diffuses et estompées, tandis que la ligne jaune est toujours nettement tranchée en même temps qu'elle offre un développement plus considérable; il ne semble donc pas qu'on puisse l'attribuer à l'hydrogène, puisque son développement ne suit pas les mêmes phases que d'autres raies qui appartiennent certainement à ce gaz.

La Chimie ne nous a, jusqu'à présent, rien dit de satisfaisant sur cette question; nous attendrons qu'elle ait parlé, et, en attendant, nous supposerons que la raie D_3 est due à une substance particulière, très-analogue à l'hydrogène, pour laquelle nous adopterons le nom déjà proposé de *hélium*. Il y aurait lieu d'examiner l'hydrogène contenu dans les pores du fer météorique, pour voir s'il ne donnerait pas cette raie; mais les chimistes qui s'en sont occupés jusqu'à présent n'y ont rien trouvé de pareil, bien qu'ils y aient reconnu le gaz des comètes.

Outre les raies que nous venons de signaler, D_3 et celles de l'hydrogène, l'étude des éclipses avait fait reconnaître celles de plusieurs autres substances, et il était intéressant de cher-

cher à les retrouver dans les observations faites en plein jour. M. Lockyer a réussi le premier à voir celles du magnésium, et nous-même, le 20 mai 1869, nous avons eu le bonheur de rencontrer, pour la première fois, une protubérance extrêmement riche. Outre D_3 et les raies de l'hydrogène α, β et γ, on en remarquait surtout deux autres : l'une brillait entre les deux raies voisines du magnésium, b_2, b_3 : l'autre était la raie b_1 du magnésium renversée : elles sont représentées en b (*fig.* 176). Nous en avons remarqué quatre autres, y

Fig. 176.



et z situées entre b et F, x entre D_3 et b, et enfin une dernière très-faible en t, tout près de D_3. Il nous a été impossible de déterminer avec certitude les substances chimiques qui correspondent à ces raies secondaires ; nous croyons que x appartient au fer.

Une circonstance nous a paru très-singulière, c'est que, de toutes les raies qui caractérisent le magnésium, une seule était renversée ; les autres restaient complétement noires, et une seule se montrait brillante dans l'intervalle qui les sépare. Ce fait était de nature à nous préoccuper, et il soulevait bien des doutes dans notre esprit, et des objections de la part d'autres savants qui regardaient l'observation comme erronée ; mais le temps et l'expérience nous ont éclairé sur ce sujet. Nous avons constaté que ces raies intermédiaires appartenaient au fer, et que celles du magnésium ne se renversaient pas toujours toutes ensemble. Nous avons été confirmé dans cette pensée, le 6 mars 1871, en voyant réellement et avec

certitude les raies du magnésium très-fortes, très-larges et si éclatantes qu'elles se diffusaient de manière à former des ovales brillants qui remplissaient l'intervalle compris entre b_2 et b_3 (*fig.* 177).

Fig. 177.



M. Lockyer a réussi à voir renversées un très-grand nombre de raies, et surtout celle du sodium, observation devenue ensuite très-commune. Un jour, il a pu observer ainsi le spectre renversé presque tout entier. Le 6 mars 1869, au moment d'une violente éruption, nous avons eu le bonheur de voir, à notre tour, cet intéressant phénomène. Le spectroscope était dirigé vers la région du vert, où se montraient plusieurs raies renversées : tout à coup une bande brillante se développa longitudinalement au milieu du spectre; elle effaça complétement toutes les raies noires, qui devinrent aussitôt brillantes. On eût dit qu'un fragment de la photosphère venait d'être lancé sur la fente du spectroscope. Ce spectacle dura à peine quelques minutes, et le spectre reprit son aspect ordinaire.

En étudiant avec beaucoup d'assiduité et de patience les grandes éruptions, on a réussi à observer un grand nombre de raies renversées; on a donc pu, en plein jour et en dehors des éclipses, constater l'existence de plusieurs vapeurs métalliques dans l'atmosphère du Soleil par leurs raies directes : telles sont les vapeurs du magnésium, du sodium, du baryum, du fer, du titane, du chrome, du calcium, etc. Ces

métaux sont précisément ceux dont les raies deviennent plus larges dans le spectre des taches.

Nous reproduisons ici une liste dressée par M. Young, dans laquelle se trouvent indiquées toutes les raies dont on a constaté le renversement dans l'atmosphère du Soleil. La première colonne contient un numéro d'ordre. La deuxième indique la position de chaque raie d'après l'échelle de Kirchhoff. La troisième fait connaître la longueur d'onde correspondante d'après Angström. La quatrième exprime la fréquence relative du renversement; le nombre 100 correspondant à une raie qui serait habituellement et constamment renversée. le nombre 60 par exemple, qui se trouve sur la première ligne, signifie que la première raie est visible dans 60 observations sur 100. La sixième contient les noms des substances chimiques correspondant aux différentes raies. La dernière indique le nom des savants qui les ont observées les premiers : Lockyer (L.), Janssen (J.), Rayet (R.), Lorenzoni (Lor.). Herschel (H.). etc

Catalogue des raies renversées dans le spectre solaire, dressé par M. Young.

NUMÉRO d'ordre	NOMBRE de Kirchhoff.	LONGUEUR D'ONDE d'après Angstrom.	FRÉQUENCE relative.	ÉCLAT relatif.	ÉLÉMENTS chimiques.	OBSERVATEURS.
1...	354,5	7060?	60	3		
2...	654,5	6677?	8	4		L.
3...	C	6561,8	100	10	H	L., J.
4...	719,0	6495,7	2	2	Ba	
5...	734,0	6454,5	2	3		
6...	743?	6431	2	2		
7...	768?	6370	2	2		
8...	816,8	6260,3	1	1	Ti	
9...	820,0	6253,2	1	2	Fe	
10...	874,2	6140,5	6	8	Ba	L.
11...	D_1	5894,8	10	10	Na	L.
12...	D_2	5889,0	10	10	Na	L.
13...	1017,0	5871	100	75		L., J.
14...	1274,3	5534,0	6	8	Ba	R., L.
15...	1281,5	5526,0	1	1	Fe	
16...	1343,5	5454,5	1	2	Fe	
17...	1351,3	5445,9	1	2	Fe, Ti	
18...	1363,1	5433,0	1	1	Fe	
19...	1366,0	5430,0	2	3		
20...	1372,0	5424,5	3	4	Ba	L.
21...	1378,5?	5418,0?	1	2	Ti?	
22...	1382,5	5412	1	1		
23...	1391,2	5403,0	2	2	Fe, Ti	
24...	1397,8	5396,2	1	2	Fe	
25...	1421,5	5370,4	1	2	Fe	R.
26...	1431,3	5360,6	2	2		R?
27...	1454,7	5332,0	2	2	Ti	
28...	1462,9	5327,7	1	3	Fe	
29...	1463,4	5327,2	1	3	Fe	
30...	1465,0?	5321	2	2		
31...	Corona ⊙ 1474,1	5315,9	75	15	Fe?	L.
32...	1505,5	5283	5	4		
33...	1515,5	5275,0	7	5		L., R.
34...	E_1	5269,5	1	3	Fe, Ca	
35...	E_2	5268,5	1	2	Fe	
36...	1528,0	5265,5	3	2	Fe, Co	L.
37...	1561,0	5239,0	1	1	Fe	
38...	1564,1	5236,2	1	1		

Catalogue des raies renversées dans le spectre solaire, dressé par M. Young. (Suite.)

NUMÉRO d'ordre.	NOMBRE de Kirchhoff	LONGUEUR D'ONDE d'après Angstrom.	FRÉQUENCE relative.	ÉCLAT relatif	ÉLÉMENTS chimiques.	OBSER-VATEURS.
39...	1567,7	5233,5	2	2	Mn	R.
40...	1569,7	5232,0	1	2	Fe	
41...	1577,3	5226,0	1	2	Fe	
42...	1580,5?	5224,5	1	1	Ti?	
43...	1601,5	5207,3	3	3	Cr, Fe?	
44...	1604,4	5205,3	3	3	Cr	
45...	1606,5	5203,7	3	3	Cr, Fe?	
46...	1609,3	5201,6	1	2	Fe	
47...	1611,5	5199,5	1	1		
48...	1615,6	5197,0	3	2		L., R.
49...	b_1	5183,0	15	15	Mg	L.
50...	b_2	5172,0	15	15	Mg	L.
51...	b_3	5168,5	12	10	Ni	L.
52...	b_4	5166,5	10	10	Mg	L.
53...	1673,9	5153,2	1	1	Na	
54...	1678,0	5150,1	1	2	Fe	
55...	1778,5	5077,8	1	1	Fe	
56...	1866,8	5017,5	2	3		R.
57...	1870,3	5015?	2	2		R.
58...	1989,5	4933,4	8	5	Ba	L.
59...	2001,5	4923,2	5	3	Fe	R., L.
60...	2003,2	4921,3	1	1		
61...	2007,1	4918,1	3	3		L.
62...	2031,0	4899,3	6	4	Ba	L.
63...	2051,5	4882,5	2	2		L.
64...	F	4860,6	100	75	H	J., L.
65...	2358,5	4629,0	1	1	Ti	
66...	2419,3	4583,5	1	1		Lor.
67...	2435,5	4571,4	1	1	Ti	
68...	2444,0	4564,6	1	1		
69...	2446,6	4563,1	1	2	Ti	
70...	2457,8	4555,0	1	1	Ti	
71...	2461,2	4553,3	3	3	Ba	
72...	2467,7	4548,7	1	3	Ti	
73...	2486,8	4535,2	1	1	Ti, Ca?	
74...	2489,5	4533,2	1	1	Fe	
75...	2490,6	4531,7	1	1	Ti	
76...	2502,5	4524,2	2	2	Ba	
77...	2505,8	4522,1	1	2	Ti	

Catalogue des raies renversées dans le spectre solaire, dressé par M. Young. (Suite.)

NUMÉRO d'ordre	NOMBRE de Kirchhoff.	LONGUEUR D'ONDE d'après Angstrom.	FRÉQUENCE relative.	ÉCLAT relatif.	ÉLÉMENTS chimiques.	OBSER-VATEURS.
78...	2537,3	4500,4	1	3	Ti	
79...	2553?	4491,0?	1	1	Mn?	
80...	2555?	4489,5?	1	1	Mn?	
81..	2566,5	4480,4	1	2	Mg	L.
82...	2581,5?	4471,4	75	8	Bandes	
83...	2585,5	4468,6	1	1	Ti	
84 .	2625,0	4443,0	1	1	Ti	
85...	2670,0	4414,6	1	1	Fe, Mn	
86. .	2683,7	4404,3	1	2	Fe	
87...	2705,0	4393,5	3	2	Ti	
88...	2719?	4384,8	1	1	Ca?	
89...	2721,2	4382,7	1	2	Fe	
90 ..	2734?	4372?	1	1		
91...	2737?	4369,3?	1	1	Cr?	
92. .	2775,8	4352,0	1	1	Fe, Cr	
93...	2796,0	4340,0	100	50	H	L., J.
94 ..	G	4307,0	1	2	Fe, Ti, Ca	
95. .	2770,0	4300,0	1	1	Ti	
96...		4297,5	1	1	Ti, Ca	
97...		4289,0	1	2	Cr	
98..		4274,5	1	2	Cr	
99 ..		4260,0	1	1	Fe	
100...		4245,2	1	1	Fe	
101...		4226,5	1	1	Ca	
102..		4215,5	1	2	Fe, Ca	
103 .	H	4101,2	100	20	H	R., L.

Pour que cette liste fût complète, il faudrait maintenant y ajouter le ruthénium, qui a été observé par M. Young. Le titane, à lui seul, présente plus de vingt raies renversées. M. Lockyer nous assure qu'il a également trouvé le potassium, le cérium et les autres métaux analogues au fer, le plomb, l'uranium, le cadmium, le strontium et peut-être l'aluminium et le zinc. Il est évident, comme nous l'avons

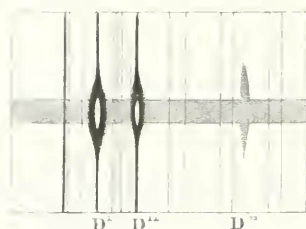
déjà fait remarquer, qu'on peut s'attendre à voir le spectre tout entier se renverser complétement, ou du moins en grande partie : il n'y a là aucune impossibilité. M. Lockyer vient de découvrir que, dans les spectres des métaux, il y a des lignes *courtes* et des lignes *longues*; les longues sont celles qui sont renversées dans le spectre solaire. On peut soupçonner que les courtes sont pour la plus grande partie des impuretés des échantillons. On n'a pas trouvé les métaux qui forment des oxydes instables, or, platine, argent, mercure, etc., mais de préférence ceux dont les oxydes sont très-stables. Dans la couche renversante du Soleil, il n'y a probablement pas de corps composés.

§ II. — *Détails sur le renversement des raies spectrales.*

On peut s'y prendre de deux manières pour observer le renversement des raies dans le spectre des protubérances : 1° on peut disposer la fente du spectroscope perpendiculairement au bord du disque ; alors il est difficile de découvrir les raies secondaires, car elles n'ont qu'une faible hauteur: nous y avons cependant réussi en amplifiant l'image des protubérances de la même manière que pour les taches; 2° on peut disposer la fente tangentiellement au bord du disque : cette méthode est plus commode et plus sûre; aussi croyons-nous devoir la préférer, et expliquer ici avec quelques détails de quelle manière se présente alors le renversement. La fente étant dirigée tout près du bord, sur une région où il existe une protubérance, on voit d'abord les raies noires dues à l'atmosphère terrestre vivement éclairées par le Soleil, plus larges qu'à l'ordinaire et comme gonflées; au milieu de cette dilatation, on verra se former une ligne brillante ordinairement très-

mince : c'est là le phénomène du renversement. Cette ligne brillante est en général très-courte, car le renversement ne se produit pas sur toute l'étendue de la protubérance; il n'a lieu qu'aux points qui correspondent aux filets lumineux les plus vifs et les plus actifs. Les raies du sodium se renversent souvent, et alors elles sont dilatées et estompées (*fig.* 178). Le magnésium est la substance pour laquelle le renversement est le plus fréquent, et l'on peut remarquer, lorsqu'il se produit, un phénomène inverse de celui qui a été décrit par M. Cornu. Ce savant physicien, en brûlant du magnésium

Fig. 178.



dans l'arc voltaïque, a vu les raies brillantes se dédoubler, une ligne noire se produisant à l'intérieur de chacune d'elles ; dans le spectre des protubérances, chaque raie brillante paraît flanquée de deux lignes noires. Il est rare que ces lignes noires disparaissent : nous l'avons cependant observé quelquefois, et alors les raies renversées étaient renflées et estompées comme deux masses brillantes ; elles s'élargissaient au point d'arriver presque à se toucher par leurs bords voisins (voir *fig.* 177). On sait que le spectre produit par un métal incandescent peut être renversé par la vapeur de ce même métal : c'est ce qui arrive lorsqu'on brûle du sodium, du thallium et quelques autres métaux dans l'arc voltaïque. Nous avons déjà décrit ces phénomènes, et nous nous contentons de les rappeler ici.

Sous le beau ciel de Palerme, M. Tacchini voit presque toujours le spectre du magnésium renversé sur une étendue considérable du bord solaire ; à Rome, nous n'y parvenons que dans les plus beaux jours. La chromosphère, analysée dans les différentes régions du spectre, présente alors l'aspect indiqué dans la *fig.* 179, dessinée et publiée par M. Tacchini (¹).

Sur le Mont Sherman, à une hauteur de 2800 mètres, M. Young a pu vérifier les observations de M. Tacchini ; il a

Fig. 179.



même réussi à voir un plus grand nombre de raies. Il est donc évident que, si nous ne voyons pas habituellement le spectre renversé sur tout le contour du disque, cela tient uniquement à la vive lumière qui illumine l'atmosphère terrestre dans le voisinage du Soleil. C'est pour cela que, en 1870, nous avons conseillé de faire une expédition sur l'Etna, où le ciel est si pur et l'air si transparent ; cette station serait peut-être plus favorable encore que celle du Mont Sherman : peut-être le renversement y serait-il complet comme dans les éclipses (²).

(¹) *Mém. des spectroscopistes italiens*, juillet 1873, *Pl. XXIX*.

(²) Pour que le lecteur puisse apprécier le degré de transparence de l'atmosphère

Il y a encore d'autres raies qu'on aperçoit plus rarement et dont l'observation est très-intéressante, par exemple celle que nous appelons B-C; elle est située à une distance de C égale à 0.45 de BC. Elle a été découverte par M. Respighi et, d'après M. Young, elle coïncide avec 654.5 K. Elle est si vive qu'elle peut quelquefois servir à étudier la forme des protubérances, et sa présence est le meilleur moyen d'apprécier les éruptions métalliques. Elle est souvent accompagnée d'une autre raie beaucoup moins visible, située à peu près à égale distance entre B et α.

On aperçoit bien souvent la raie 1474 K., dont nous avons déjà parlé à propos des éclipses; elle est toujours accompagnée d'un grand nombre de celles qui caractérisent le fer; mais, d'après nos recherches, on ne doit pas l'attribuer à ce metal. M. Janssen assure que cette raie est plus forte dehors que sur les protubérances : telle au moins elle s'est présentée à lui dans l'éclipse du 5 avril 1875. M. Lorenzoni voit habituellement $f = 4544$ d'Angström. Les autres sont indiquées dans le tableau ci-dessus.

Pour voir ainsi les raies renversées sur le bord général du disque solaire, il faut choisir un moment où l'atmosphère est parfaitement pure et transparente; il est absolument impossible de réussir lorsque le ciel est brumeux et blanchâtre, car la lumière atmosphérique masque alors complétement le phénomène qu'on veut observer. Il est bon de mettre la lunette en mouvement plusieurs fois de suite : il arrive rarement qu'on aperçoive les raies renversées du premier coup;

de Palerme, nous dirons que, ayant appliqué le prisme à vision directe à la lunette de Palerme pour former le spectre sur la fente du spectroscope, les mastics se sont bientôt fondus, ce qui ne nous est jamais arrive à Rome avec une lunette de puissance égale.

mais, en revenant à la charge, on finit par les voir. Telle est la pratique de M. Tacchini. Il faut de plus employer une excellente lunette, car, si elle n'est pas capable de donner une image nette des objets qui ne sous-tendent qu'un angle moindre que une seconde, elle ne pourra évidemment pas servir à observer cette couche si mince, dont la composition est si complexe ; il sera impossible de voir des raies dont l'épaisseur ne correspond qu'à une fraction de seconde : aussi M. Proctor a-t-il raison de dire que, pour distinguer tous ces détails, il faut employer une lunette capable de résoudre des étoiles doubles très-voisines, comme γ d'Andromède. Il faut cependant éviter un grossissement et une dispersion trop considérables, qui feraient perdre trop de lumière.

Les raies renversées n'ont pas toutes la même hauteur. Si l'on en excepte celles de l'hydrogène, elles sont généralement très-basses. Cependant, lorsqu'il se présente des nuages très-brillants au-dessus des éruptions, nous avons quelquefois observé des raies métalliques à des hauteurs de 60 et même 90 secondes ; mais ces cas sont très-rares. Les métaux ne se montrent généralement qu'à la base des protubérances ; aussi pouvons-nous regarder la présence des vapeurs métalliques à des hauteurs considérables comme le caractère qui distingue essentiellement des protubérances ordinaires les éruptions proprement dites. Dans les régions situées au-dessus de 90 secondes, nous n'avons jusqu'à présent observé que l'hydrogène. M. Tacchini fixe à 10 pour 100 le nombre des protubérances à spectre mixte ; les 90 autres ne contiennent que l'hydrogène mélangé à la substance qui produit la raie D_3. Mais il faut distinguer les époques d'activité solaire : en temps de calme, les raies métalliques sont très-rares ; c'est ce qui s'est vu par exemple en 1874 et 1875.

Il n'est pas nécessaire d'observer des protubérances élevées

pour voir les raies métalliques; partout où la chromosphère est vive et composée de flammes brillantes, quelque faible que soit sa hauteur, elle donnera naissance à un spectre multiple [1] : le magnésium et le fer seront toujours en plus grande quantité que les autres métaux. Ce n'est donc pas seulement dans les éruptions qu'on voit certaines raies du spectre renversées: mais on peut observer le même phénomène dans des portions très-considérables du contour solaire sans qu'il y ait de protubérance proprement dite. Cette remarque est extrêmement importante, car elle montre que les protubérances ne sont que des variations de niveau d'une couche qui enveloppe complétement le Soleil. Nous avions annoncé ce fait depuis longtemps, et l'observation des éclipses nous permettait déjà de le regarder comme certain. La couche rose qui se voyait au bord du Soleil éclipsé, s'étendant sur des arcs très-grands, n'était que la chromosphère.

M. Cornu a montré, par des expériences concluantes, que les raies ne se renversent pas toutes à la même température; il ne faut donc pas être surpris que la chromosphère nous présente un si petit nombre de raies brillantes, tandis que le spectre solaire contient une telle multitude de lignes noires : c'est une question de température, compliquée de la nature des substances, qui ne nous sont pas encore toutes connues.

§ III. — *De quelques particularités des raies spectrales.*

Lorsqu'on observe au spectroscope les protubérances les plus brillantes, on remarque plusieurs particularités qui semblent au premier abord peu importantes, mais qui sont

---

(1) Tacchini, *Conferenza sulle forme delle protuberanze*, etc. Palermo; 1872.

cependant très-intéressantes, à cause des conclusions qu'on en peut tirer. Le langage de la nature est toujours rempli des nuances les plus délicates, surtout lorsqu'il s'adresse à nous par le moyen du spectroscope; il faut l'étudier avec soin, afin de le bien comprendre; il ne faut pas négliger un seul détail, quelque minime qu'il paraisse, car les plus petites particularités peuvent être la source de conséquences importantes, comme nous le verrons bientôt de la manière la plus évidente. Les faits dont il s'agit n'ont pas encore été

Fig. 180.



étudiés assez complétement pour que nous puissions apercevoir les liens qui les unissent; nous les exposerons donc simplement avec toute la clarté et la précision possibles.

Dans ces recherches, la fente doit avoir peu de largeur, et l'on doit être en mesure de la régler convenablement suivant les besoins de l'observation. On ne doit pas la rendre trop étroite, car, en diminuant outre mesure l'intensité de la lumière, on nuirait souvent au résultat.

La fente étant disposée perpendiculairement au bord, on voit la raie C présenter la forme indiquée dans la *fig.* 180. Elle est divisée en deux parties distinctes par le bord lui-même; à l'intérieur du disque elle est noire, tandis qu'elle

est brillante à l'extérieur. Tel est le cas ordinaire et pour ainsi dire normal ; mais il se présente souvent une particularité sur laquelle nous voulons appeler l'attention du lecteur : lorsqu'on observe une protubérance un peu vive, on voit souvent la partie brillante empiéter sur la surface du disque, et quelquefois d'une quantité considérable (*fig.* 181) ; alors

Fig. 181.



elle paraît terminée en pointe effilée à ses deux extrémités, même à la partie inférieure. Ce phénomène s'observe surtout auprès des taches ; la raie brillante se prolonge alors jusqu'au noyau, bien qu'il soit encore éloigné de quelques secondes du bord solaire (*fig.* 182). L'éruption dont la raie brillante

Fig. 182.



nous révèle l'existence s'étend donc sur toute la région comprise entre le bord de la tache et celui du disque. Nous avons observé ce phénomène tant de fois qu'il devient inutile d'indiquer les dates des observations.

Quelquefois la raie brillante est élargie à sa base (*fig.* 183), et elle se termine à sa partie supérieure en pointe tellement fine que, là où elle cesse d'être visible, il est impossible d'apercevoir la raie noire de l'atmosphère terrestre ; on ne voit

qu'une teinte uniforme sans aucune apparence de ligne lumineuse ou obscure : le gaz incandescent existe donc au-dessus de la partie visible de la raie brillante, seulement son éclat y est moins vif, et la lumière qu'il envoie se trouve masquée par celle de notre atmosphère. On a autrefois contesté la légitimité de cette conclusion, mais il est impossible d'en douter

Fig. 183.



maintenant, car elle est confirmée par les observations faites pendant les éclipses.

La raie brillante présente quelquefois une forme tout à fait différente : elle est composée de deux parties de largeur inégale, situées sur le prolongement l'une de l'autre (*fig.* 184);

Fig. 184.

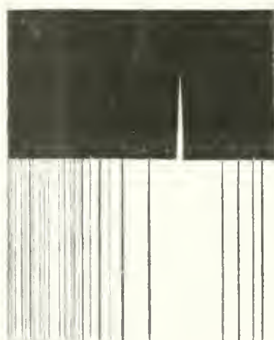


la partie la plus voisine du Soleil est plus large; puis le diamètre varie brusquement sans aucune transition, et la partie supérieure est composée d'un simple filet très-mince et très-faible. Il y a donc deux régions séparées par une limite nettement définie, dans lesquelles règnent des températures bien différentes l'une de l'autre. Ce sont probablement deux jets indépendants superposés qui produisent cette apparence.

La raie D_3 présente la forme indiquée dans la *fig.* 185.

Nous avons déjà dit que sa hauteur et son éclat ne sont pas toujours en rapport avec l'éclat et la hauteur des autres raies [1]. Comme elle se projette sur un fond clair, on ne peut pas observer toutes ses dilatations avec autant de précision que celles de la raie C. On peut cependant la mettre à profit pour analyser les grandes protubérances avec une fente plus large, car alors on voit briller dans cette couleur les principales veines fluides; elles sont très-vives et complétement débarrassées de la nébulosité qui les enveloppe toujours dans la raie C.

Fig. 185.



La raie F est ordinairement moins élevée que D, et elle est plus dilatée à sa base (*fig.* 186). Si on la regarde attentivement avec un spectroscope puissant, même dans le spectre solaire direct, on trouve que, au lieu d'être nettement tranchée, elle est diffuse et comme estompée sur les bords. Cette raie présente la même apparence dans le spectre de Sirius et dans celui des autres étoiles appartenant au même type. Sa

---

(1) Ces faits ont été révoqués en doute, mais ils sont confirmés par les observations de M. Lockyer. (*Proceedings of the Royal Society*, vol. XVIII, p. 355.)

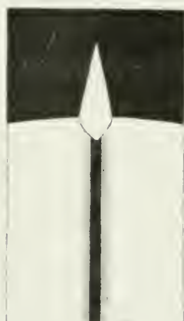
dilatation est très-sensible; sa partie supérieure se termine souvent en pointe, tandis que la base pénètre dans l'intérieur

Fig. 186.



du disque solaire. La partie brillante ressemble alors à un fer de lance dont la raie noire représente la tige (*fig.* 187).

Fig. 187.

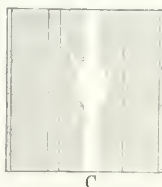


§ IV. — *Conclusions qui résultent des particularités signalées dans le paragraphe précédent.*

Les phénomènes dont nous venons de parler sont extrêmement intéressants, à cause des conséquences que nous pou-

vons en déduire relativement à la température du Soleil et à la pression qui s'exerce sur la surface de cet astre. Pour commencer par la pression à laquelle est soumise la chromosphère, les dilatations qu'éprouvent les raies nous montrent qu'elle n'est pas aussi faible qu'on l'avait supposé; car, d'après les recherches de Plücker, de Wüllner et de Cailletet, les raies de l'hydrogène ne commencent à s'élargir et à devenir diffuses qu'à la pression de 400 millimètres, c'est-à-dire $\frac{1}{2}$ atmosphère environ; la pression à la surface du Soleil doit donc être au moins égale et même supérieure à cette limite; mais, en considérant l'intensité de la pesanteur à la

Fig. 188



surface solaire, la masse capable d'exercer cette pression serait bien peu de chose.

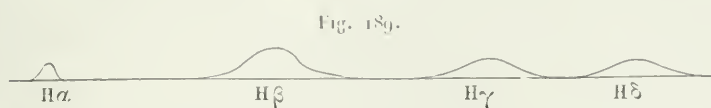
Lorsque la fente est disposée tangentiellement au bord du disque, on voit encore les raies se dilater et se gonfler aux points où elles traversent les protubérances (*fig.* 188). Il est vrai que la chaleur peut produire un effet analogue : lorsque la température s'élève, les raies deviennent plus larges sans que la pression devienne plus considérable; mais, dans ce cas, le bord de chaque raie demeure nettement tranché, tandis qu'il est diffus ou estompé lorsque le gaz devient à la fois plus chaud et plus dense.

Dans le spectre du Soleil, aussi bien que dans celui des étoiles, les raies les plus réfrangibles sont aussi les plus diffuses. Le spectre de Sirius présente des raies très-dilatées,

comme l'indique la *fig.* 189; ce phénomène n'est pas aussi prononcé dans le spectre solaire, mais il y est déjà bien sensible.

La diffusion correspond généralement aux parties les plus brillantes des protubérances, et, lorsqu'elles sont nombreuses, les renflements se succèdent comme les grains d'un chapelet

Fig. 189.



(*fig.* 190 et 191). La partie la plus large n'est pas toujours la plus basse, mais elle correspond à la région la plus vive. Ainsi l'on trouve une dilatation plus considérable dans les nuages qui surmontent les jets filaires que dans la partie filiforme qui se développe à la base. On a voulu expliquer ces

Fig. 190.



Fig. 191.



phénomènes en les considérant comme de simples apparences dues à l'irradiation; à cela nous devons répondre que nous avons observé la diffusion des raies avec un grand nombre d'instruments sortis des ateliers des meilleurs opticiens; il est impossible d'admettre que tous ces instruments présentent d'aussi grands défauts; d'ailleurs cette explication ne saurait s'accorder avec les apparences que nous offre l'observation directe du spectre des gaz. En examinant des tubes de Geissler à des températures très-différentes, nous obtenons ordinaire-

ment pour l'hydrogène deux spectres absolument différents. Le premier est composé de quatre raies fondamentales fines et nettement tranchées, accompagnées d'un grand nombre d'autres raies plus fines : c'est celui qui a été décrit par M. Morren. Nous avons obtenu un résultat différent en faisant agir sur la bobine le courant de douze grands éléments et en augmentant la tension de la décharge par un condensateur; examiné à l'œil nu, le tube était d'un rouge plus foncé que dans le cas précédent; en l'observant au spectroscope, nous avons constaté que les raies secondaires avaient disparu; il ne restait plus que les quatre principales, très-belles, brillant d'un vif éclat, mais beaucoup plus larges qu'à l'ordinaire. L'expérience ayant été prolongée pendant quelque temps, nous vîmes apparaître une raie jaune; nous avons pour un instant cru voir la raie D_3; mais cette raie jaune appartenait au sodium dû à la décomposition du verre. On voit donc que, par la seule élévation de la température, on obtient un spectre composé de quatre raies principales, comme celui des protubérances du Soleil; mais cette température doit être extrêmement élevée. Nous avons essayé de calculer la température du filet d'hydrogène ainsi illuminé, et nous avons trouvé un chiffre que nous hésitons à énoncer : ce serait 500 000 degrés au moins!

Il resterait à examiner, pendant les éclipses, si le sommet des protubérances ne donnerait pas le spectre de premier ordre de l'hydrogène. On serait porté à le croire, car les raies sont très-fines dans ces régions; mais cette observation ne peut être faite en dehors des éclipses, car l'illumination de notre atmosphère empêcherait de reconnaître les bandes secondaires, qui sont peu lumineuses [1].

---

[1] Cette expérience, faite lors d'une éclipse, trancherait la question de savoir si

Si nous connaissions la pression à laquelle sont soumis les gaz qui composent la chromosphère, nous pourrions évidemment, à l'aide du spectroscope, déterminer leur température. Réciproquement, étant donnée leur température, nous arriverions à connaître leur pression; mais, dans l'état actuel de nos connaissances, il nous est impossible de séparer ces deux inconnues, et le problème reste indéterminé. Tout nous porte cependant à penser que cette température est extrêmement élevée, et surtout il nous semble impossible d'expliquer autrement la rapidité surprenante avec laquelle se soulèvent les masses énormes qui constituent les éruptions dont nous avons déjà parlé. Elles continuent à s'élever avec une vitesse très-considérable, même lorsque leur partie inférieure est séparée du bord solaire; on doit cependant supposer qu'elles sont alors soustraites à l'action de la force d'impulsion qui a produit le mouvement. Cette force a donc dû être prodigieuse, ce qui indique une grande quantité de chaleur dépensée et transformée en force vive.

Lorsqu'un gaz s'écoule dans le vide, la vitesse qu'il possède dépend de la température, et ces lois paraissent s'appliquer au mouvement des gaz incandescents qui composent les protubérances solaires. M. Rayet, partant de cette idée, a calculé les vitesses que posséderait un gaz s'écoulant librement dans le vide à la surface du Soleil. Voici les résultats auxquels il est parvenu :

Températures.	Vitesses.
o	km
0	7
1000	17
2000	21
3000	27

les spectres des gaz sont doubles ou simples, et si les bandes du spectre de l'hydrogène donné par M. Morren sont dues à l'acétylène ou aux impuretés des gaz.

M. Rayet s'arrête à 3000 degrés, mais c'est une limite beaucoup trop faible; car on peut assurer avec certitude que la température de la surface solaire est beaucoup plus élevée. Supposons seulement 100 000 degrés, nous arriverons à 153 kilomètres par seconde, vitesse que l'on a réellement observée.

En considérant ces vitesses énormes, ces courbes en forme d'arcade qui rappellent celles de nos aurores boréales, on s'est demandé si tous ces changements de forme des protubérances étaient dus à des mouvements mécaniques. Ne seraient-ce pas de simples apparences dues à des changements d'état physique? Ces changements d'état ne seraient-ils pas produits par des actions électriques ou par quelque autre force de même nature? Les masses nébuleuses s'illuminent avec tant de rapidité, elles se dissolvent ensuite en si peu de temps, que l'on est porté à voir là une transformation momentanée plutôt qu'un transport réel de matière pondérable.

Nous sommes loin de nier l'existence et l'action des forces électriques dans le Soleil. En supposant que les changements de forme des protubérances soient simplement produits par des expansions de matières gazeuses, il est évident qu'il en résultera un développement considérable d'électricité. Il y a cependant des difficultés sérieuses qu'il convient d'examiner attentivement.

Quelle est la nature intime de cette force que nous appelons l'*électricité?* On la regardait autrefois comme un fluide d'une nature particulière, seul capable de produire les phénomènes que nous appelons *électriques;* on pouvait alors supposer ce fluide animé d'un mouvement très-rapide, et admettre qu'il agit dans la masse incandescente du Soleil d'après les mêmes lois que sur la Terre. Mais les physiciens ont adopté aujourd'hui une manière de voir tout à fait différente;

pour eux, les phénomènes électriques sont de simples manifestations extérieures des modifications intimes que les corps éprouvent dans leur état thermodynamique [1]. S'il en est ainsi, ces mêmes phénomènes doivent se manifester dans le Soleil, mais sur une tout autre échelle, et sans doute avec des apparences bien différentes. La température habituelle est déjà si élevée qu'elle met les molécules des gaz dans un état comparable à celui que nous produisons artificiellement et d'une manière passagère à l'aide des forces électriques les plus puissantes qui soient à notre disposition. Si donc ces mêmes forces agissent sur la matière déjà incandescente qui compose le Soleil, elles doivent produire des phénomènes qui nous sont tout à fait inconnus. Tout ce que nous pourrions dire serait donc un jeu de notre imagination, et ce serait nous tromper nous-même que d'appliquer à la Physique solaire les lois des phénomènes électriques que nous étudions dans des circonstances absolument différentes. Ajoutons que déjà, lorsqu'il s'agit des phénomènes relatifs au globe terrestre entier, les choses ne sont plus si claires. Quelques physiciens admettent que tout le globe est électrisé, quelques autres ne l'admettent pas; et ainsi de plusieurs autres questions.

On a fait remarquer avec beaucoup d'insistance que les grandes éruptions solaires coïncident ordinairement avec les aurores boréales terrestres. Comme ces derniers phénomènes sont certainement électriques, on en conclut que l'électricité doit aussi agir sur le Soleil et réagir sur la Terre. Nous ne nierons pas cette coïncidence, car elle se vérifie bien souvent. Nous ferons même remarquer que, longtemps avant les der-

---

[1] Cette proposition nous paraît résumer la nature des phénomènes électriques indépendamment de toute hypothèse sur la nature de l'agent, que ce soit l'éther ou un autre fluide spécial.

nières découvertes, en 1861 surtout, nous avions signalé la coïncidence des aurores boréales avec les apparitions des taches, ce qui veut dire, comme nous le savons maintenant, la coïncidence avec les éruptions et par conséquent avec les protubérances. Le P. Mancini avait même, à notre demande, fait une discussion très-étendue, et prouvé que les coïncidences sont très-nombreuses. Le P. Ferrari l'a continuée sous notre direction, avec un succès toujours plus assuré. Nous sommes persuadé qu'il existe une relation entre ces deux ordres de phénomènes. Mais quelle est cette relation? Comment l'électricité solaire peut-elle avoir une influence quelconque sur le globe terrestre? Si l'espace qui sépare les deux astres est vide de matière pondérable, l'induction électrostatique est impossible, aussi bien que la communication directe de l'électricité. L'induction dynamique pourrait bien s'exercer, de même qu'elle s'exerce entre les aimants à travers des espaces vides, mais nous ne savons rien sur son mode d'action. Cette action se propagerait-elle par la composante des mouvements longitudinaux de l'éther ou par les vibrations transversales qui produisent la lumière ou par les petits tourbillons qui propagent le magnétisme? Le magnétisme solaire parviendrait-il jusqu'à nous sous forme de rayonnement lumineux, de sorte que la lumière puisse être appelée un *mouvement magnétique* (¹)?

Il faut avouer que la Science n'est pas en état de résoudre ces questions, et le temps qu'on emploierait à les traiter serait ici perdu pour notre sujet. Ce qui nous paraît actuellement

---

(¹) M. Maxwell a déjà développé une « Théorie magnétique de la lumière, » qui n'est autre chose au fond que la propagation de la lumière et du magnétisme par le même éther; mais il reste à décider si c'est un mouvement identique ou différent qui constitue les deux phénomènes, lumière et magnétisme.

le plus probable, c'est que : 1° le Soleil agit d'une manière bien assurée, mais peut-être indirecte, sur les causes qui constituent le magnétisme terrestre. Son activité se développe et s'exalte à certaines époques, et les planètes doivent nécessairement participer à ces variations; les rayons calorifiques arrivant en plus grande abondance sur notre globe, il doit se produire une perturbation dans la météorologie terrestre : les phénomènes physiques dont notre atmosphère est le siége se trouvent modifiés, et il n'est pas surprenant que le nombre des aurores boréales augmente dans des circonstances aussi exceptionnelles. Cette manière de voir semble corroborée par une coïncidence remarquable : dans les régions équatoriales, les bourrasques, les cyclones et les pluies présentent des variations périodiques bien marquées, ainsi que l'ont fait voir MM. Meldrum et Poëy; or cette période coïncide précisément avec la période décennale des taches solaires. M. Tacchini vient de trouver que les périodes des neiges hivernales, à Palerme, coïncident avec les minima des taches! 2° Une action directe d'ordre magnétique paraît indiquée par la période undécennale des taches solaires et des phénomènes magnétiques terrestres, sans qu'on puisse assigner jusqu'à présent une variation proportionnelle dans la température terrestre ni solaire. Cette action magnétique pourrait bien s'exercer à travers l'éther seul d'une manière qui nous est encore inconnue.

Si l'on admet que les espaces interplanétaires sont remplis d'une matière pondérable très-légère, analogue à celle qui est le siége de la lumière zodiacale, la question paraît plus facile à résoudre, mais alors il se présentera une difficulté bien grande au point de vue de la Mécanique céleste. Comment cette matière ne modifie-t-elle pas, par sa résistance, le mouvement des astres?

Nous devons cependant rappeler quelques faits qui semblent favorables à cette doctrine, car ils paraissent annoncer des forces capables de transporter l'hydrogène électrisé du Soleil jusque sur la Terre : nous voulons parler de la force répulsive dont on admet généralement l'existence dans la matière qui compose les comètes, et de l'action diamagnétique des corps aimantés sur l'hydrogène; mais ces forces sont si peu connues, leurs lois si obscures, leur nature si incertaine, qu'on ne saurait en faire la base d'une théorie sérieuse. Personne n'est plus disposé à ces spéculations que nous, mais nous croyons que pour le moment *il faut attendre*.

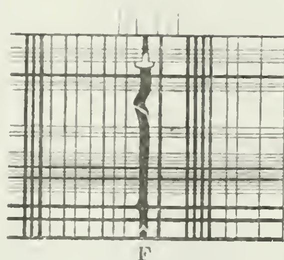
Quant à la question qui nous occupe en ce moment, savoir si les mouvements de la matière incandescente qui constitue les protubérances sont réels ou apparents, elle sera singulièrement éclaircie, nous croyons même pouvoir dire qu'elle sera résolue par les faits que nous allons exposer dans les paragraphes suivants. Après les avoir étudiés sérieusement, on n'hésitera pas à conclure avec nous que les éruptions solaires ne peuvent s'expliquer par de simples illuminations dues à des décharges électriques; ce sont de véritables mouvements mécaniques, des transports de matière pondérable lancée avec une vitesse dont nous n'avons ailleurs aucun exemple.

§ V. — *Des changements de réfrangibilité observés dans les raies.*

M. Lockyer remarqua, en observant les éruptions solaires, que les raies spectrales paraissent quelquefois se recourber et présentent alors des sinuosités irrégulières, comme si la fente rectiligne du collimateur était remplacée par une ouverture de forme bizarre. La *fig.* 189 montre l'apparence que présente la

raie F fortement infléchie dans le voisinage d'une tache où elle était encore partiellement renversée ([1]). Ce phénomène a été également observé par M. Young, de Dartmouth (États-Unis);

Fig. 192.



les *fig.* 193 et 194 représentent la forme des raies F et C observées dans une tache par ce savant astronome : ces obser-

Fig. 193.

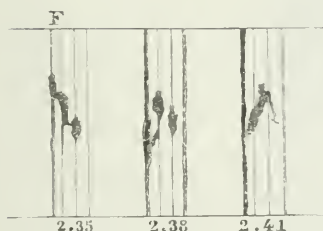
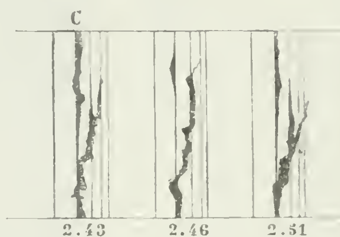


Fig. 194.



vations ont été faites le 22 septembre 1870, aux heures indiquées au bas de chaque figure ([2]).

Ces phénomènes sont encore plus remarquables dans les protubérances qui se projettent en dehors du disque solaire, et nous avons vu bien souvent, en observant des masses for-

---

([1]) Il va sans dire que, dans cette figure de M. Lockyer, les raies horizontales ne sont que les lignes longitudinales produites par les grains de poussière sur la fente.

([2]) Young, *Spectr. Notes : Journal of Franklin Institute*, p. 8; 1870.

tement incandescentes, la raie C prendre une forme sinueuse ou brisée comme on le voit en *a*, *b* (*fig.* 195).

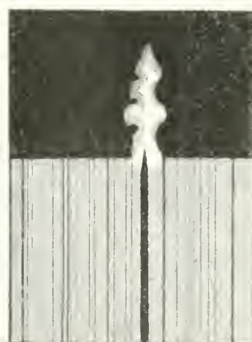
M. Lockyer a constaté des mouvements et des inflexions bien extraordinaires, en observant les protubérances. Ainsi

Fig. 195



il a vu (*fig.* 196) la raie F se prolonger en dehors du disque en une masse brillante ayant la forme d'une flamme ondulée.

Fig. 196.



Les *fig.* 197 à 201 représentent les aspects successifs d'une même protubérance observée dans la raie F : comme la précédente, elle se prolongeait en dehors du disque solaire en présentant des formes bizarres et capricieuses. Lorsqu'on observe avec une fente large, ces mouvements rapides donnent aux protubérances brillantes l'aspect d'une masse confuse très-instable et difficile à comprendre (*fig.* 196). En général, ces formes sont très-fugitives : lorsqu'on observe attentivement

un jet lancé avec vigueur, on trouve dans sa constitution quelque chose de confus : les filets qui le composent semblent diffus et agités sur leurs bords ; ils présentent le même aspect que si les rayons lumineux traversaient un courant d'air chaud. On serait tenté, au premier abord, d'attribuer ces apparences à une agitation de l'air atmosphérique ; mais on ne tarde pas à reconnaître qu'il est impossible d'admettre cette explication, car cette agitation n'existe point dans les autres parties de l'image solaire, et l'on distingue très-nettement les

Fig. 197.



Fig. 198.



Fig. 199.



Fig. 200.



Fig. 201.



plus petits détails ; en rétrécissant la fente, on voit que les raies de l'hydrogène sont dilatées et mal terminées sur un de leurs bords.

Ces apparences offrent à l'observateur un intérêt tout particulier, et elles peuvent conduire à des conséquences de la dernière importance : dans les observations spectrales, il ne faut négliger aucun détail. Lorsque ces phénomènes furent annoncés pour la première fois, ils soulevèrent chez nous, comme chez beaucoup d'astronomes, une très-grande défiance ; même après les avoir vérifiés, nous étions peu disposé à les regarder comme réels, et nous nous sommes demandé pendant longtemps si nous n'étions pas victime d'une illusion due à des

défauts de l'instrument, à l'agitation de l'air ou à quelque autre cause.

Il est incontestable que certaines apparences analogues à celles que nous venons de décrire peuvent être dues à des illusions. Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de simples inflexions des raies spectrales, elles peuvent provenir des différences d'éclat que présentent les différents points d'une même protubérance : en effet, la fente ayant nécessairement une certaine largeur, se projette pour l'observateur sur une série de points inégalement brillants qui ne sont pas rigoureusement alignés (*fig.* 202) : on verra donc, de part et d'autre de la ligne centrale, des points plus ou moins éclairés : on sera

Fig. 202.



porté par là à attribuer à la raie spectrale une sinuosité qu'elle ne possède pas. De même, il suffit que les prismes ou l'oculaire ne soient pas rigoureusement mis au point pour que les raies paraissent doubles ou diffuses. L'air chaud qui est en contact avec la fente peut aussi, par les réfractions qu'il occasionne, produire une agitation apparente de l'image.

Toutes les circonstances que nous venons d'exposer peuvent se présenter : elles peuvent donner naissance à certaines déformations des raies ; mais il ne faut pas en conclure que toutes les déformations observées soient nécessairement dues à ces causes ou à d'autres semblables. Ainsi, lorsqu'on voit une raie spectrale d'une manière très-distincte, les différentes parties de l'appareil étant mises au point d'une manière très-satisfaisante, si l'on aperçoit tout à coup l'image devenir extrêmement trouble, se doubler ou se diffuser sur l'un de ses bords, se déplacer même dans une portion de la longueur à

droite ou à gauche, il est impossible d'attribuer ces apparences à un défaut dans la mise au point, surtout lorsque ce phénomène, après avoir duré quelques instants, cesse aussi brusquement qu'il avait commencé. Quant à l'agitation de l'air, elle peut exister et produire certaines illusions; mais son action doit alors s'exercer sur tous les objets visibles dans le champ de l'instrument ; par conséquent, lorsqu'on est témoin de ces dilatations et de ces déformations, on doit d'abord se demander si les apparences que l'on observe peuvent être attribuées à quelqu'une des causes accidentelles que nous venons d'énumérer. Si l'on acquiert la conviction que toutes ces explications sont insuffisantes, il faudra chercher ailleurs la cause de ces singuliers phénomènes. Or des observations nombreuses nous ont convaincu que, dans beaucoup de cas, ces déformations existent sans qu'il soit possible de les attribuer aux imperfections des instruments : il s'agit donc de phénomènes ayant une réalité objective et non de simples apparences produites par des jeux de lumière ; ces phénomènes ont une cause réelle qui doit avoir son siége dans le Soleil, et c'est cette cause qu'il s'agit de rechercher et d'étudier maintenant.

§ VI. — *Explication des phénomènes décrits dans le paragraphe précédent.*

Ces phénomènes peuvent se résumer en un seul mot : *variation dans la réfrangibilité des rayons lumineux*. Quant à l'explication théorique, il nous semble que l'on ne peut adopter que l'une des deux suivantes : 1° une même raie peut être due à des rayons dont la réfrangibilité varie avec la température du corps qui émet ces rayons; 2° le mouvement du

corps lumineux peut influer sur les propriétés et sur le degré de réfrangibilité des rayons qu'il émet. Mais, comme jusqu'à présent aucun fait, aucune observation, ne nous autorisent à admettre la possibilité de variations dues à la température, il faut chercher à expliquer les phénomènes par la seconde des causes énoncées. Pour que le lecteur comprenne bien ce qu'il y a de fondé dans cette explication, nous devons faire connaître en quelques mots les travaux des physiciens sur ce sujet.

Doppler, en 1842, a fait observer, et M. Fizeau, en 1848, a confirmé par ses expériences qu'un mouvement rapide de translation imprimé à un corps sonore altère la tonalité du son qu'il produit : suivant que le corps sonore se rapproche ou s'éloigne de l'observateur, le son devient plus aigu ou plus grave. Des expériences ingénieuses ont constaté ces variations, et du reste tout le monde peut les vérifier par une observation bien simple : lorsque deux trains de chemin de fer se croisent, le sifflet de l'une des locomotives se rapproche d'un observateur placé sur l'autre train jusqu'au moment de la rencontre, il s'éloigne ensuite ; le son doit donc paraître plus aigu d'abord, plus grave dans la seconde partie de l'observation : c'est ce qui a lieu en effet. D'ailleurs, voici une expérience bien simple et bien facile à reproduire. On prépare deux diapasons parfaitement d'accord, de sorte que, si l'on fait directement résonner l'un des deux, l'autre vibrera par sympathie. Si maintenant l'on met l'un des deux en mouvement, l'autre diapason fixe reste silencieux, et si l'on veut qu'il puisse vibrer par sympathie, il faut le modifier de manière à lui faire rendre un nombre de vibrations qui dépend de la vitesse du mouvement de translation donné à l'autre instrument.

Ces phénomènes sont faciles à comprendre si l'on se rappelle la nature du son et les circonstances qui déterminent sa tona-

lité. Le son est transmis à l'oreille par les vibrations de l'air, et il est d'autant plus aigu que notre organe reçoit plus de vibrations pendant le même temps, ou bien, ce qui revient au même, il est d'autant plus aigu que l'onde sonore est plus courte. Supposons donc que le corps sonore se rapproche du lieu de l'observation, les vibrations se produisant en des points de plus en plus rapprochés de l'observateur arriveront à son oreille avec plus de fréquence que si le corps était resté immobile ; il en recevra donc un plus grand nombre dans le même temps, et par conséquent le son lui paraîtra plus aigu. Le contraire aurait lieu si le corps sonore s'éloignait, chaque vibration s'achèverait avec un petit retard ; on en recevrait un moins grand nombre dans le même temps, et le son paraîtrait plus grave [1]. Il est probable que le timbre se trouve aussi modifié ; mais contentons-nous des variations de tonalité que nous venons d'exposer, et voyons maintenant comment on peut appliquer à la lumière ce que nous avons dit du son.

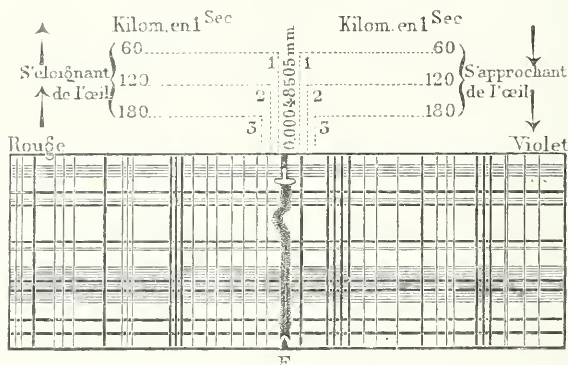
La longueur de l'onde lumineuse détermine la couleur du rayon et son degré de réfrangibilité. Si les ondes se raccourcissent, le rayon devient plus réfringent et la couleur se rapproche du violet ; si elles s'allongent, le rayon devient moins réfringent et la couleur se rapproche du rouge. Prenons comme exemple la raie F qui se trouve dans le bleu, et dont la longueur d'onde est $\frac{486.93}{1000000}$ de millimètre ; si le mouvement

---

(1) On peut encore exprimer cette théorie d'une autre manière. L'onde n'est que l'espace parcouru par le mouvement vibratoire dans le milieu élastique, pendant le temps d'une vibration du corps sonore : ainsi l'onde sera raccourcie ou allongée de toute la quantité dont le corps se déplace pendant ladite vibration, selon qu'il marche dans un sens ou dans l'autre. Il faut cependant faire connaître que M. Van der Willigen a émis des doutes sur cette théorie appliquée à la lumière, où les vibrations sont transversales; mais les physiciens ne paraissent pas avoir été convaincus par ses objections.

du corps lumineux était capable d'augmenter la longueur d'onde de $\frac{40,63}{10000000}$ de millimètre, la raie F viendrait prendre dans le vert la place de la raie E. Mais, pour arriver à ce résultat, il faudrait une vitesse de 32 000 kilomètres par seconde, vitesse mille fois plus considérable que celle de la Terre à son périhélie, puisqu'alors elle ne parcourt que 30 kilomètres environ. Mais il n'est pas nécessaire que les déviations des rayons lumineux soient aussi considérables pour qu'on puisse les constater, et nos spectroscopes peuvent éva-

Fig. 203.



luer des quantités mille fois plus petites. Ainsi la distance entre D′ et D″ du sodium correspond à une différence de longueur d'onde de $\frac{0,4}{10000000}$ de millimètre ; or, avec un bon spectroscope, on peut facilement mesurer une distance dix fois moindre ; à plus forte raison cette grandeur sera-t-elle appréciable si l'on se contente d'estimer approximativement les inflexions d'une ligne droite. Pour produire cette translation de D′ en D″, il faudrait une vitesse de 304 kilomètres ; on voit donc que le spectroscope peut faire apprécier les déplacements produits par une vitesse de 30 kilomètres environ.

En examinant la *fig.* 203 (que nous empruntons à

M. Schellen), on peut voir approximativement les positions que prendrait la raie F pour des vitesses de 60, 120, 180 kilomètres; elle viendrait successivement se mettre sur le prolongement des lignes pointillées marquées des nombres 1, 2, 3.

Ces principes étant bien compris, il est facile d'expliquer les variations de réfrangibilité qu'éprouvent les raies spectrales des protubérances. Les gaz mis en mouvement par les éruptions solaires peuvent être lancés dans toutes les directions; s'il arrive qu'un jet de matière lumineuse soit lancé dans la direction de l'observateur, les rayons qui parviennent jusqu'à nous auront des ondes lumineuses plus courtes, leur réfrangibilité sera augmentée, et dans le spectroscope on les verra se dévier vers le violet; la déviation aura lieu vers le rouge si la matière lumineuse est lancée dans un sens contraire : dans les deux cas, le déplacement apparent observé dans le spectroscope pourra servir à apprécier la vitesse du mouvement de translation. Ainsi un déplacement égal à la distance qui sépare les raies D′ et D″ correspond à une vitesse de 30¼ kilomètres. Il est assez rare que la déviation produite dans le spectroscope soit aussi considérable, et, même alors, il est difficile de la mesurer, car ces phénomènes sont très-fugaces; comme ils se produisent instantanément, sans que rien puisse les faire prévoir, on n'est jamais bien prêt à les observer et l'on profite mal des quelques instants pendant lesquels ils sont visibles; aussi ne réussit-on qu'à la condition d'être très-exercé à ce genre d'observations et d'avoir à sa disposition un instrument très-puissant.

Lorsqu'une masse considérable est mise en mouvement, les différentes parties qui la composent possèdent nécessairement des vitesses très-différentes : il en résulte, dans le spectroscope, des déplacements irréguliers qui ont pour effet d'élargir les raies et de les rendre diffuses; en déterminant

le maximum de cette dilatation, on pourra calculer la vitesse de translation correspondante. Nous ne croyons pas avoir jamais observé des déplacements égaux à la distance qui sépare D′ et D″, mais on ne peut affirmer que cela soit impossible. Les plus grands déplacements que nous avons vus et mesurés correspondent à une vitesse d'environ 30 à 90 kilomètres : cela suffit pour nous donner la certitude que les mouvements observés dans les protubérances sont de véritables mouvements mécaniques et non de simples apparences, ainsi que nous le disions à la fin du § IV.

La variation de la réfrangibilité, qui est un phénomène très-important, peut devenir un moyen de recherche très-délicat. Ainsi nous avons pu déterminer la vitesse de rotation du Soleil en observant au spectroscope les deux extrémités du diamètre équatorial et en mesurant ainsi le petit déplacement qu'éprouve la raie C par rapport aux raies atmosphériques qui l'entourent. M. Zöllner et M. Vogel ont vérifié nos conclusions en employant dans leurs recherches un appareil spécial, le spectroscope à réversion. M. Zöllner appelle ainsi un spectroscope composé de deux prismes à vision directe disposés en sens contraire l'un de l'autre, ce qui permet de constater et d'apprécier la plus légère différence dans la position des raies qui composent chacun des deux spectres. C'est ainsi qu'il a pu s'assurer que certaine raie très-fine occupait des positions sensiblement différentes, suivant qu'il observait le bord oriental ou le bord occidental du disque solaire. Il y a longtemps que nous avions employé, pour observer les étoiles, un système de deux prismes opposés entre eux : nous aurons occasion d'en parler plus tard. Au lieu du second prisme à vision directe accouplé au premier, M. Zöllner emploie maintenant un simple prisme à angle droit placé en avant de l'oculaire, à peu près comme une chambre claire : une portion du

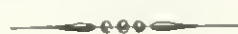
spectre se trouve ainsi renversée par réflexion totale sur l'hypoténuse du prisme, et l'on peut la comparer avec la partie qui est transmise directement.

Revenons encore un instant sur la vitesse avec laquelle sont lancés les gaz qui constituent les protubérances. S'il est vrai, comme tout nous porte à le croire, que ces phénomènes sont de véritables mouvements mécaniques, il est évident que les masses animées de semblables vitesses doivent obéir à des forces très-considérables, et ces forces ne peuvent être autre chose que des pressions. Il est cependant impossible d'admettre l'existence de ces pressions énormes dans la région extérieure du globe solaire qui est accessible à nos instruments. Une pression de 15 atmosphères suffit pour que le spectre de l'hydrogène devienne continu ; il commence à être diffus sous une pression bien plus faible, 400 millimètres de mercure, ou environ $\frac{1}{2}$ atmosphère. Il faut cependant des forces beaucoup plus considérables pour lancer des masses énormes à une aussi grande hauteur, malgré la gravitation solaire ; ces forces ne peuvent donc provenir que de la masse intérieure du Soleil et des réactions chimiques qui s'accomplissent tumultueusement dans son sein. Il nous semble naturel et légitime de conclure que les éruptions ne peuvent être considérées, ainsi que le dit M. Faye, comme de petites agitations de la chromosphère; nous devons, au contraire, les regarder comme des preuves certaines des crises violentes qui bouleversent la masse intérieure du globe solaire.

On a supposé que les masses gazeuses des protubérances sont lancées par des orifices percés dans la couche, solide selon quelques-uns, liquide selon d'autres, qui termine le Soleil. Nous avons déjà fait connaître un grand nombre de raisons qui nous empêchent d'admettre l'existence de cette couche solide ou liquide au moins tout près de la surface. Contentons-

nous, pour le moment, de constater que cette hypothèse est complètement inutile pour l'explication des phénomènes qui nous occupent. Il peut bien se produire des explosions au sein d'une masse gazeuse, et ces explosions peuvent occasionner une expansion soudaine et violente; il suffit pour cela que deux gaz se rencontrent et se combinent, et c'est ce qui arriverait sur la Terre si des masses considérables de chlore et d'hydrogène venaient à se mélanger en présence de la lumière solaire. On ne peut pas nous objecter que la forme filamenteuse des protubérances suppose une éruption à travers un orifice capable de donner cet aspect aux masses incandescentes : bien souvent, en effet, nous avons observé la même structure dans des masses isolées et suspendues dans l'atmosphère solaire; souvent aussi nous avons vu des nuages se transformer en filets lumineux et en veines fluides analogues aux filets et aux veines qui composent les protubérances; et cependant il n'y avait dans ces nuages aucun orifice qui pût servir à mouler la matière lumineuse.

Il est facile de comprendre ces explosions si l'on se rappelle la constitution des gaz. Lorsque les fluides élastiques sont soumis à une forte pression, comme celle qui existe à de grandes profondeurs au-dessous de la surface du Soleil, ils peuvent passer à cet état intermédiaire entre l'état gazeux et l'état liquide dont parlent Cagniard-Latour et Andrews. Or cet état est très-instable; il suffit alors de faibles variations dans la pression pour produire des explosions dont nous n'avons aucune idée. Rien de plus vraisemblable que ces actions violentes dans un corps comme le Soleil, composé de masses énormes de matières hétérogènes portées à une température très-élevée. Il est donc inutile de recourir à des orifices percés dans des couches résistantes, solides ou liquides.



CHAPITRE V.

DISTRIBUTION DES PROTUBÉRANCES.

§ I. — *Historique.*

L'observation des éclipses totales avait fait connaître les protubérances; mais, s'il avait fallu attendre, pour les étudier, le retour de ces phénomènes exceptionnels, il aurait été à peu près impossible de reconnaître leur distribution à la surface de l'astre et leur relation avec les autres faits de la Physique solaire. Déjà en 1851, M. Schweizer avait soupçonné qu'il existe quelque relation entre elles et les facules (¹); mais comment aurait-on pu parvenir à démontrer cette relation? Au moyen du spectroscope, on peut observer assidûment les protubérances toutes les fois que l'état du ciel permet de voir le Soleil pendant quelques instants; il est donc devenu facile d'étudier leur distribution et les relations qu'elles peuvent avoir avec les facules et avec les taches.

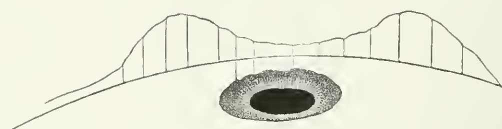
Peu de temps après la découverte de M. Janssen, nous faisions remarquer que les protubérances sont plus nombreuses, plus élevées et plus brillantes dans la région des taches, autour desquelles elles forment souvent une proéminence, une sorte

(¹) Voir *Astr. Nach.*, nᵒˢ 489, 1275, 1348.

de bourrelet, dans cette région où nous savons qu'il existe toujours des facules (*fig.* 204) ([1]).

On révoqua en doute la réalité de cette coïncidence, mais nous l'avons constatée bien des fois depuis cette époque et avant qu'on introduisît l'usage de la fente élargie; mais le procédé d'observation était très-pénible. Peu de temps après, M. Zöllner fit remarquer la facilité avec laquelle on pouvait observer les éruptions en tenant la fente élargie. Les premiers essais que nous fîmes de cette méthode furent peu satisfaisants : la grandeur considérable de l'image, dans notre

Fig. 204.



réfracteur, rendait les protubérances méconnaissables pour notre œil, alors peu exercé. En octobre 1869, M. Zöllner montra sa manière d'observer à Vienne, et nous reçûmes des renseignements précieux des astronomes allemands qui vinrent ensuite à Florence se réunir pour la mesure du méridien central européen. Ayant ainsi reconnu la cause de notre insuccès, qui était la grandeur de l'image, nous engageâmes M. Respighi, qui avait à sa disposition une lunette plus petite, à s'en occuper à son tour. Ce savant réussit à faire une série d'observations de bords solaires d'un grand intérêt. De notre côté, nous eûmes bientôt vaincu les difficultés qui nous avaient d'abord arrêté, et nous pûmes, dès le mois de dé-

([1]) Voir *Bullettino meteorologico del Osservatorio del Collegio Romano*, nov. 1868, p. 90; *Memoria III sullo spettro solare; Soc. Italiana*, t. I, 3e série.

cembre suivant, examiner les protubérances avec fente élargie; nous reconnûmes même les nombreux avantages qu'avait une image de dimensions considérables sur une petite.

M. Respighi, par ses résultats, confirma nos conclusions, et il fut amené, par une étude assidue et rapide, mais qui, faute de temps, était nécessairement superficielle, à formuler quelques propositions très-intéressantes, mais qui demandaient à être discutées avec plus de précision.

Il est certaines vérités qu'on entrevoit assez facilement lorsqu'on aborde les phénomènes nouveaux de la nature; la difficulté est de les présenter sous un aspect assez saisissant pour convaincre les autres. Dans la question qui nous occupe en ce moment, il fallait mettre en évidence les relations qui existent entre les protubérances, les différents éléments de la rotation solaire, la position des taches et celle des facules; il fallait donc observer avec soin et simultanément les taches et les facules, qu'on n'avait étudiées jusqu'alors qu'en passant, d'une manière très-vague et indépendamment les unes des autres. Tel est le but que nous nous sommes proposé en entreprenant peu après une série d'observations aussi suivies que possible, et en les dirigeant de manière à pouvoir coordonner et discuter facilement les résultats. Notre travail ne fut pas infructueux; au bout de quelques mois, nous étions en possession de matériaux nombreux, dont la discussion nous conduisit à des conclusions nouvelles si évidentes, si intéressantes, qu'elles nous encouragèrent à continuer ce pénible travail. Nous l'avons poursuivi avec persévérance depuis le 23 avril 1871 jusqu'à ce jour (30 janvier 1876), toutes les fois que le ciel a été assez pur pour permettre des observations fructueuses.

Après cette première publication de nos résultats, M. Respighi reprit ses observations antérieures et les discuta d'après

la méthode que nous avions adoptée, et l'on put ainsi reculer de plusieurs mois l'historique des phénomènes solaires. Nous verrons bientôt l'importance de cette addition. Depuis cette époque, cette étude prit un essor considérable; la Société spectroscopique italienne fut fondée, et son but était de ne laisser passer un jour sans explorer les bords du Soleil autant qu'il était possible. MM. Tacchini, Spörer, Bredichin, etc., s'engagèrent dans ces recherches : on fonda des observatoires destinés aux recherches solaires, comme à Potsdam, en Prusse; à Oxford, en Angleterre; à Calcutta, aux Indes; et les instruments colossaux des Young, des Winlock, des Langley y furent employés en Amérique.

Si cet élan ne s'arrête pas, on aura bientôt, pour la discussion des lois des protubérances, des matériaux aussi nombreux que ceux qu'on possède pour les taches.

Nous allons exposer, dans ce Chapitre, les méthodes d'observation et les résultats qui ont été obtenus.

§ II. — *Méthode d'observation.*

On élargit la fente du collimateur et l'on observe les protubérances en déterminant leurs formes et l'angle de position d'après les procédés que nous avons indiqués précédemment. Pour enregistrer leurs positions sur une figure, on peut employer deux méthodes différentes. On peut d'abord les rapporter sur une ligne droite de longueur déterminée et divisée en 360 parties, qui représentent les degrés de la circonférence du disque; on a ainsi l'avantage de réunir sur une même feuille les observations de plusieurs jours consécutifs, et l'on peut y voir d'un coup d'œil la durée des chaînes de protubérances qui se succèdent d'un jour à l'autre en longitude : c'est

ce qui a déterminé M. Respighi et la Société spectroscopique à adopter dans leurs publications ce procédé économique ; mais on perd l'avantage de voir d'un seul coup d'œil les relations qui peuvent exister entre les protubérances et les autres phénomènes observés à la même époque sur la surface du disque. C'est ce qui nous a engagé à employer une autre méthode : nous enregistrons les protubérances sur la circonférence d'un cercle, le même sur lequel nous dessinons chaque jour les taches et les facules. C'est ce procédé qui nous a fait reconnaître immédiatement les relations qui existent entre ces différents phénomènes.

Voici comment nous procédons à ce travail. Toutes les fois que le ciel est assez pur pour permettre les observations, nous commençons par faire la figure du disque solaire sur une projection de 244 millimètres de diamètre ; nous employons pour cela notre équatorial de Cauchoix, dont la lunette suit le Soleil, étant mise en mouvement par une horloge. Lorsque l'image du disque est tracée, nous dessinons toutes les taches et même le contour des facules, qu'on aperçoit assez facilement, grâce à l'obscurité qui règne sous le dôme, où l'observateur n'est éclairé que par l'image du Soleil, la lumière du jour étant écartée par un rideau noir. Nous pouvons même dessiner les granulations qui existent dans les différentes parties du globe, et surtout à certaines époques aux calottes polaires. Grâce au mouvement automatique de l'équatorial, l'observation est facile et très-précise sans beaucoup de peine.

Cette première opération étant terminée, on marque sur la feuille de papier la direction du mouvement diurne de la sphère céleste ; pour cela, on fait tourner la lunette autour de l'axe de l'appareil, de manière à laisser passer sur la figure l'image d'une tache bien nette, l'instrument restant immobile.

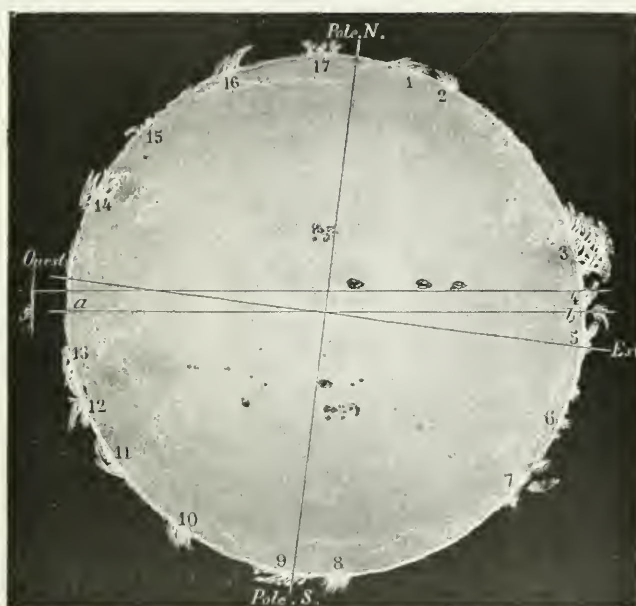
et l'on marque les points où elle rencontre la circonférence à l'entrée et à la sortie; on peut toujours faire en sorte qu'elle passe assez près du centre. La corde ainsi obtenue doit être considérée comme parallèle à l'équateur céleste, car on peut évidemment négliger le mouvement du Soleil en déclinaison pendant le passage, mouvement qui est bien peu sensible dans un temps aussi court, et qui ne peut introduire aucune erreur appréciable dans un procédé graphique qui n'exige pas une précision absolue. On trace un diamètre parallèle à cette corde, puis on place sur la figure un cercle métallique gradué avec beaucoup d'exactitude et dont les degrés sont numérotés dans le même ordre que ceux du cercle de position qui porte le spectroscope; à l'aide de ce rapporteur, on reproduit facilement sur la figure la position des protubérances à mesure qu'on les observe. Les nombres inscrits sur le rapporteur ne sont point reproduits sur la figure, le zéro seul y est marqué; il vaut mieux conserver la liberté d'inscrire d'autres nombres en prenant un autre système de coordonnées, par exemple celui des latitudes héliographiques : nous verrons bientôt qu'il peut y avoir à cela plusieurs avantages.

Ensuite on parcourt soigneusement tout le bord en marquant toutes les protubérances; lorsqu'on en a trouvé une, on amène la fente à être exactement tangente au point de la circonférence solaire qui lui correspond, ce qu'on peut faire avec une approximation supérieure à un degré, on rapporte sa position sur la figure et on la dessine avec toute l'exactitude possible. On évalue les dimensions en hauteur par la grandeur de l'image que le chercheur de l'équatorial projette sur le carton (*fig.* 151, p. 5); dans les cas plus importants, on les mesure avec le micromètre à lame de verre (p. 29). On évalue la base par l'arc compris entre les deux extrémités.

D'après les dimensions de nos dessins, une hauteur de 1 millimètre correspond à un angle de 7″,9, ou, en nombre rond, à 8 secondes; pour la base, un degré correspond à peu près à 16 secondes. Les détails dignes d'être notés sont dessinés à part dans de plus grandes proportions.

Lorsqu'on a ainsi fait le tour du disque solaire, on revient

Fig. 205.



sur les points les plus importants pour les observer de nouveau; l'attention doit se porter principalement sur le bord oriental afin de voir si, pendant le travail précédent, il ne s'est pas produit quelque phénomène digne d'attention. La durée de cette observation dépend du nombre et de la complication des protubérances; elle est d'une heure environ. La *fig.* 205 est la reproduction du dessin exécuté le 23 juillet 1871 entre $8^h 30^m$ et $9^h 55^m$.

Ces opérations terminées, on trace sur la figure l'axe de l'ellipse suivant laquelle se projette l'équateur solaire, en calculant sa position à l'aide de la table que nous avons donnée tome I, page 22; une droite perpendiculaire à la précédente donne la direction du méridien qui passe par les pôles du Soleil. La figure 205 est une réduction au tiers et demi, obtenue par la photographie : aussi ressemble-t-elle parfaitement à l'original. Ces dessins donnent une idée exacte de l'ensemble des phénomènes et de leurs dimensions par rapport au globe solaire. Nous allons donner une courte description de la figure précédente en commençant par le pôle nord. La droite *ab* représente la direction du mouvement diurne de la sphère céleste.

N° 1. Double protubérance de structure filaire, inclinée vers l'équateur. Les filets sont très-distincts à la base, mais au sommet un léger nuage relie les deux masses et rend leur structure intérieure moins nette. L'intensité lumineuse est faible.

N° 2. Protubérance composée de filaments, dirigée en sens contraire de la précédente. Les protubérances 1 et 2 sont reliées à leurs sommets par quelques bandes faiblement lumineuses. Vient ensuite un arc de chromosphère recouvert de poils inclinés vers l'équateur dans la première partie, vers le pôle dans la seconde.

N° 3. Protubérance gigantesque. On distingue nettement à la base plusieurs jets filamenteux ; parvenus à une certaine hauteur, ils se croisent dans toutes les directions ; au sommet ils se diffusent et finissent par former un véritable nuage. La hauteur est de 2′40″. La lumière n'est pas très-vive, si ce n'est à la base du jet principal. Cette masse mit plusieurs jours à passer sur le contour apparent du Soleil : on commença à la voir le 22, et elle ne disparut que le 27. A partir du 24, des arcs

de structure filamenteuse la réunirent à la protubérance n° 5. Le 27, sa hauteur avait considérablement diminué, lorsqu'on aperçut une tache venant à sa suite. C'est le 24 qu'elle atteignit son maximum ; sa hauteur était alors de 3′10″, environ dix fois le diamètre de la Terre. Sa forme variait d'un jour à l'autre d'une manière très-frappante. En longitude, elle occupait une étendue de 65 degrés ; en latitude, sa plus grande largeur fut de 50 degrés. Le 13 juillet, on observa vers le sud-ouest une masse semblable, plus élevée et d'une structure plus compliquée. La forme générale de cette protubérance porterait à la comparer à un arbre, mais, en observant avec attention, on a pu s'assurer qu'il n'y avait pas de ramifications proprement dites ; les filets ne se subdivisaient pas comme les rameaux d'un arbre : il n'y avait que des apparences trompeuses dues à des jets enflammés, parfaitement distincts, qui s'entre-croisaient en se projetant les uns sur les autres. Le dessin a été exécuté à $8^h 40^m$.

N° 4. Flamme inclinée vers le pôle nord : c'est la direction générale de tous les filets lumineux dans cette région.

N° 5. Masses de flammes semblables à la précédente ; la principale est dirigée vers le pôle nord ; il y a un jet secondaire dirigé en sens opposé. Entre ces deux protubérances, on aperçoit un nuage isolé composé de filaments dont la direction est contraire à celle des protubérances elles-mêmes. Ces filaments se détachent d'une masse plus vive qui forme comme un centre de radiation duquel s'échappent une multitude de filets incandescents.

N° 6. Petites flammes qui s'élancent dans toutes les directions, entourées de chromosphère recouverte de jets nombreux.

N° 7. Autre nuage complétement isolé, de structure filaire parfaitement nette. Sa hauteur est de 80 secondes environ.

A sa base, on voit un petit monticule composé de filets parallèles au bord.

N° 8. Près du pôle sud, protubérance composée de filets parfaitement séparés les uns des autres, presque perpendiculaires au bord du Soleil. Lumière très-faible. Du n° 8 au n° 9, la chromosphère est très-peu élevée.

N° 9. Autre protubérance filaire très-basse : les filets sont inclinés et ils se terminent par un petit nuage filaire qui surmonte une masse cumuliforme. Ces deux masses demeurent à la même place pendant plusieurs jours à cause de leur proximité du pôle.

N° 10. Flammes inclinées, très-belles, de structure filaire, composées à la base de trois jets distincts qui se confondent au sommet.

N° 11. Groupe composé de trois flammes : celle du milieu est cumuliforme ; les deux autres, de directions opposées entre elles, tendent à la recouvrir.

N° 12. Tache qui s'approche du bord. Jets nombreux, peu élevés, mais très-vifs : deux d'entre eux sont recourbés et inclinés vers le pôle sud, suivant la direction la plus commune dans cette région.

N° 13. Masse très-vive, d'où s'échappe une traînée plus brillante qui passe évidemment au devant des pointes des flammes moins élevées ($9^h 10^m$). La base de cette masse s'incline vers l'équateur ; son sommet a une direction opposée, comme s'il était renversé par l'action d'un courant énergique. La raie C était sensiblement diffuse, ce qui tient à la variation de réfrangibilité. La raie du sodium était renversée ; on n'examina pas les autres raies. A 5 heures, il ne restait plus que quelques jets lumineux peu étendus et à peu près insignifiants.

N° 14. Deux jets inclinés en sens opposé et qui se croisent

à leur partie supérieure, où ils sont entraînés par un courant de grande intensité. Ils se trouvent sur le contour d'une tache voisine du bord. Un peu plus loin, au-dessus des facules, on voit des flammes petites, mais très-brillantes.

N° 15. Nuage léger, incliné vers l'équateur, suivi de deux autres flammes plus petites.

N° 16. Très-beau système de jets filaires inclinés vers le nord et recourbés au sommet. Il se trouve à la limite des granulations indiquées par une ligne sinueuse qui va du n° 16 au n° 1.

N° 17. Groupes de jets filaires presque verticaux. Leur direction est incertaine, ce qui témoigne de l'influence d'un courant peu intense. Ces protubérances polaires ont subsisté pendant plusieurs jours.

Le lecteur voit dans cet exemple un spécimen des dessins qui nous ont servi à établir nos discussions; mais il ne suffit pas de faire des dessins et d'en examiner avec soin les plus petits détails : il faut ensuite faire un travail de synthèse, travail qui ne se fait bien que sur des nombres. Voici comment nous procédons pour arriver à des résultats numériques.

Après avoir tracé sur le disque la ligne des pôles du Soleil, à l'aide du rapporteur et d'une règle graduée, nous déterminons pour chaque protubérance : sa distance angulaire sur le bord au pôle nord [1], sa hauteur, sa largeur. Ces chiffres sont inscrits dans un tableau; on y ajoute une courte description, l'indication de la direction des jets, et le produit numérique de la hauteur par la longueur de la base. Nous obtenons ainsi un tableau de six colonnes qui sert de point de départ à tous nos travaux futurs.

---

(1) A la rigueur, la distance prise ainsi n'est pas la distance au pôle solaire, mais bien à sa projection; mais comme cette projection tombe toujours très-près du bord, la différence de position ne devient jamais considérable.

Enregistrement des protubérances observées le 23 juillet 1871 de $8^h 30^m$ à $9^h 55^m$ (voir fig. 205).

POSITION.	HAUTEUR.	LARGEUR.	AIRE.	DESCRIPTION.	
12°	6	5	30	Deux jets filaires réunis avec nuage...	—
21	6	4	24	Masse faible filamenteuse...........	+
64	10	8	80	Première partie de la grande masse des jets	+
74	20	7	140	Gros jet de la grande masse réunie..	+
80	7	5	35	Autre semblable. Nuage entre les deux.	+
102	3	2	6	Petit groupe de fils................	+
108	4	3	12	Petit groupe de fils................	—
118	5	3	15	Masse lumineuse..................	—
122	10	5	50	Nuage suspendu filamenteux........	±
130	5	8	40	Masse de fils presque horizontale....	
170	6	5	30	Fils presque verticaux.............	+
180	7	7	49	Fils obliques rares................	±
206	6	5	30	Beaux jets de fils inclinés	+
230	7	10	70	Trois jets, deux en sens opposé, un au milieu vertical................	±
243	9	5	45	Deux beaux panaches filaires........	+
248	5	3	15	Beaux fils très-vifs sur la tache......	+
254	6	3	18	Jet lucide renversé en haut.........	+
280	7	5	35	Deux beaux jets vifs................	+
307	4	2	8	Petit jet bas	—
330	8	5	40	Deux magnifiques jets filaires........	+
352	6	5	30	Trois jets filaires verticaux...	+

LIMITES DES GRANULATIONS.	FACULES.	INCLINAISONS.
6 N.	de 48° à 68°	Concordantes ... 12
146 S.	de 79 à 84	Discordantes.... 4
192 S.	de 95 à 121	
330 N.	de 224 à 233	
	de 239 à 261	
	de 280 à 296	

Avec ce premier tableau, nous faisons ensuite quatre autres, où les protubérances sont disposées d'après leur angle de position sur la circonférence du disque, de 10 en 10 degrés, à partir du pôle nord : 1° le premier de ces tableaux contient l'indication des hauteurs; 2° le deuxième celle des largeurs; 3° le troisième contient le produit de la base par la hauteur. Comme la base est mesurée avec une unité double de celle qui sert pour la hauteur, ce produit représente la surface de la protubérance supposée triangulaire, approximation qu'on peut regarder comme suffisante. 4° Il y a un dernier tableau pour les facules. Plusieurs de ces tableaux ont déjà été publiés dans nos Mémoires; nous nous contenterons de donner les résultats d'une manière succincte, avec un spécimen de la manière dont se fait ce dépouillement (p. 136).

§ III. — *Distribution des protubérances. — Résultats obtenus. — Nombres relatifs.*

Les observations dont nous pouvons donner les résultats embrassent soixante-deux rotations solaires complètes, suivies toutes au Collége Romain. Nous y avons ajouté trois périodes de M. Respighi, qui embrassent l'intervalle antérieur du 26 octobre 1869 au 30 avril 1871, dont on verra bientôt l'importance. Le tout comprend six ans et trois mois d'observations. Sans doute, cette période n'est pas suffisante pour que nous puissions en tirer des lois définitives, mais elle nous apprend déjà des choses très-importantes, que nous présenterons aux lecteurs comme un essai de ce que nous réserve pour l'avenir cette étude féconde.

Pour la discussion que nous allons aborder, il faut d'abord distinguer entre le nombre *absolu* des protubérances et leur nombre *relatif*. Le premier dépend de l'assiduité de l'obser-

vateur, de l'état du ciel, de la bonté de l'instrument et du critère pratique que se forme l'observateur pour la classification des objets : c'est le nombre brut des observations recueillies. Ce nombre doit être modifié par des corrections convenables, pour le rendre comparable aux autres. Ainsi, pendant un mois serein d'été, on recueillera une abondante moisson d'observations, car on peut les faire chaque jour dans des conditions favorables. En hiver, ce sera le contraire : le mauvais temps restreindra beaucoup le nombre des jours d'observations. On aurait bien tort de juger de la fréquence moyenne des protubérances par ces chiffres enregistrés : il est évident qu'il faut les rapporter à chaque jour individuel, en divisant la somme par le nombre des jours, pour obtenir la fréquence relative; mais, s'il s'agit d'étudier seulement la distribution de ces objets sur le bord solaire, cette opération n'est pas nécessaire, car (pourvu que les bords soient complets) le nombre, pour une certaine partie du contour, sera toujours relatif au total noté.

Dans le tableau A (p. 160), on a résumé : d'abord la date approchée du commencement de la rotation, en prenant la durée synodique de vingt-sept et de vingt-huit jours alternativement [1]; ensuite, dans les colonnes 3 et 4, le nombre total absolu des protubérances enregistrées, en tenant cependant séparés les deux hémisphères; puis, dans la colonne 5, le nombre des jours d'observation pour chaque rotation. Si ce nombre se trouve assez petit quelquefois, cela tient à l'état du ciel, car les jours où j'étais empêché, le R. P. Ferrari a fait l'observation à ma place. Nous avons fait plusieurs séries pour déterminer notre équation personnelle, et nous

---

(1) Pour la première année, on a réuni à la dernière rotation les jours résiduels, afin d'y faire rentrer toute l'année. Cette rotation, du reste, était très-pauvre.

avons fini par nous trouver sensiblement d'accord. La colonne 6 donne le rapport du nombre total au nombre des jours d'observation.

Quant aux dimensions, la limite minimum de hauteur a été fixée à 3 unités de notre échelle, c'est-à-dire à 24 secondes. Il y a cependant une circonstance qu'il ne faut pas dissimuler, et qui tend à diminuer le nombre au commencement de la série et à l'augmenter à la fin : c'est que, pendant que les protubérances sont très-nombreuses, on en trouve un grand nombre dans la même dizaine de degrés, et elles sont toutes évaluées comme une seule, de largeur égale à leur somme ; de plus, un grand nombre de petites est involontairement négligé. Au contraire, aux époques des minima, il est rare que plusieurs soient dans la même dizaine de degrés, et l'observateur tient compte plus soigneusement des plus petites. Cette remarque doit servir de règle pour l'appréciation de certains résultats.

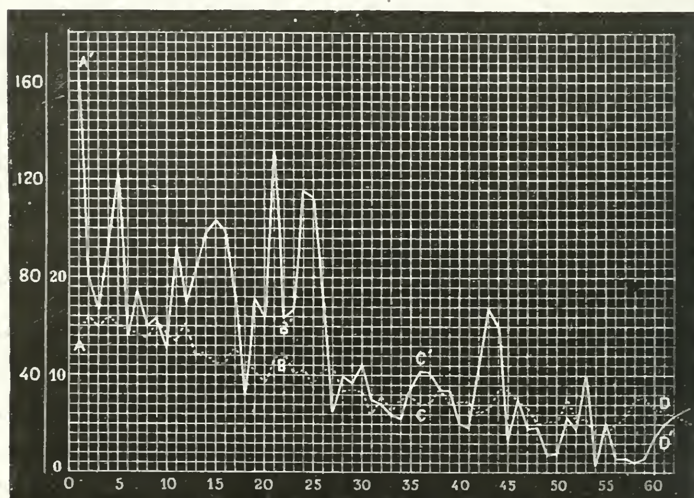
Dans une seconde partie de ce même tableau, nous avons enregistré le nombre des groupes *nouveaux* de taches qui ont paru dans chaque rotation ; mais, comme la quantité des taches est évaluée trop arbitrairement par ce nombre, nous en avons donné la superficie telle qu'elle est mesurée sur les dessins journaliers, l'unité de surface étant un carré de 8 secondes de côté ; suit le nombre des jours d'observations des taches, et enfin leur superficie divisée par le nombre des jours d'observations (colonnes 7, 8, 9, 10).

L'examen du tableau A nous conduit aux conclusions suivantes :

1° Si nous considérons le nombre moyen des protubérances visibles sur le bord solaire, sans aucune distinction de grandeur, nous voyons que ce nombre varie beaucoup avec le temps ; il y a à certaines époques une diminution très-sensible,

qui arrive presque à une disparition absolue. Pour en rendre la marche plus évidente, nous avons tracé, dans la *fig.* 206, la courbe ABCD, dont les ordonnées représentent le nombre des protubérances, et les abscisses les rotations. On voit par là comme cette diminution est progressive. Déjà, à la XXe rotation, le nombre des protubérances est réduit à un tiers, et

Fig. 206.



de quinze il est descendu à dix. Cette diminution continue toujours, et à la LVe et LXe rotation, nous sommes au-dessous du tiers. Cette diminution est encore plus frappante si l'on considère les jours isolés Au commencement, nous avions souvent jusqu'à quarante protubérances séparées, et dans les derniers jours nous en avons eu quelquefois deux ou trois seulement (janvier 1876). Cette diminution des protubérances est encore plus frappante après l'évaluation de leur superficie calculée comme il a été dit au paragraphe précédent. On trouve, par exemple, les valeurs suivantes :

Rotation.	Superficie.
IIIe	11634
XXe	1222
XLe	1129
LXe	637

2° Si nous considérons uniquement les protubérances dont la hauteur dépasse 40 secondes, d'après de nombreux tableaux que nous ne pouvons reproduire ici, nous trouvons une diminution encore plus notable à partir de la VIe rotation (septembre 1871) : cette diminution a continué, sauf de petites oscillations, jusqu'à l'époque actuelle, 1876, où les protubérances sont assez rares.

3° Si nous considérons les protubérances dont la hauteur dépasse 64 secondes, la diminution est encore plus frappante à partir de la Ve rotation (*voir* le tableau D, p. 166). Il y a donc eu un maximum d'activité entre la Ire et la Ve rotation, c'est-à-dire depuis le mois d'avril jusqu'au mois d'août 1871 : ce maximum a été suivi d'une époque de calme relatif dans la force qui produit les protubérances. Ce calme a progressé jusqu'en 1876. Nous ne pouvons encore nous prononcer si 1876 est une époque de minimum absolu, car les fluctuations sont trop considérables dans des périodes même de courte durée.

4° Avec la diminution du nombre, nous devons encore signaler le défaut presque absolu d'éruptions vives et donnant des spectres métalliques, et l'absence presque générale de l'inclinaison accentuée et de la courbure des jets.

A la courbe des protubérances, dans la *fig.* 206, nous avons ajouté la courbe A'B'C'D' de l'étendue moyenne dans chaque rotation de la superficie des taches, et l'on voit que les deux courbes marchent dans le même sens, mais sans qu'il y ait proportionnalité. La courbe des taches présente plus d'ir-

régularités et de saccades. Il y a plusieurs raisons de cette différence, que nous analyserons ailleurs. Il nous suffira de dire ici que, si nous tenions compte seulement du nombre des groupes, le résultat serait faussé en partie; car, dans la dernière période, la surface totale des taches est singulièrement réduite, quoique leur nombre n'ait pas diminué d'une manière très-sensible.

§ IV. — *Distribution des protubérances par latitudes héliographiques.*

Le tableau B, p. 162, nous donne la distribution des protubérances suivant les latitudes, de 10 degrés en 10 degrés. On le comprend mieux en groupant les rotations cinq par cinq et en construisant les courbes figuratives, ce qui se trouve exécuté dans la *fig.* 207 ci-contre. Il faut faire attention que les trois premières courbes se rapportent aux trois périodes empruntées à M. Respighi, qui sont marquées de la lettre R, pour les raisons que nous verrons tout à l'heure.

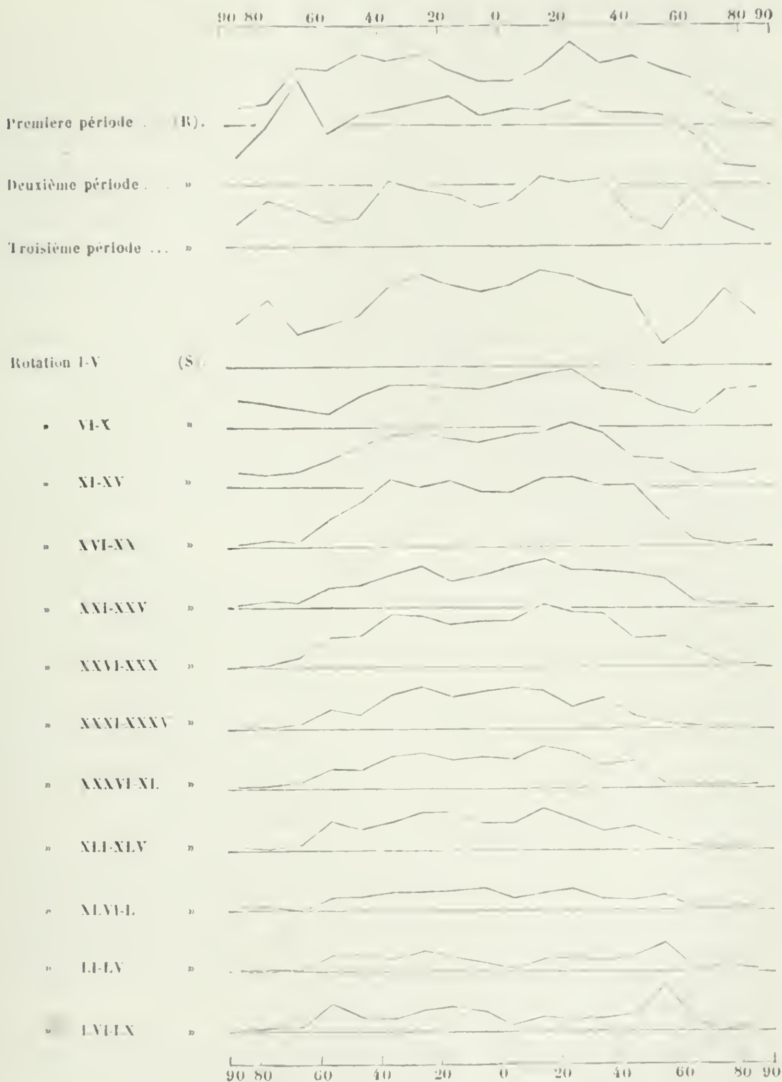
Voici les conclusions principales auxquelles nous avons été conduit par cet examen :

1° Au commencement de notre série, il y a en général deux maxima, l'un dans l'hémisphère nord, situé entre 20 et 30 degrés, l'autre dans l'hémisphère sud, entre 10 et 20 degrés.

2° Jusqu'à la VIe rotation, on observe en outre deux maxima secondaires très-nettement prononcés, situés dans les deux hémisphères entre 70 et 80 degrés; ils s'affaiblissent progressivement et finissent par disparaître. Les observations de M. Respighi, commencées en octobre 1869, prouvent qu'à cette époque les maxima polaires n'existaient pas; ils se sont donc développés dans le courant de l'année 1870, et sont

arrivés au maximum en avril 1871. Du 26 octobre 1869 au

Fig. 207.— Courbes représentant le nombre des protubérances observées sur le bord solaire et distribuées selon les latitudes héliographiques.



30 avril 1870, la courbe ressemble à celle des rotations XVI

à XX (18 juin-5 novembre 1872). Le pôle nord a montré son maximum avant le pôle sud, et l'intervalle de la Ire à la Ve rotation (23 avril-10 septembre) renferme le maximum absolu, ce qui est très-important.

3° Au commencement de la série, nous avons un minimum secondaire sur l'équateur, entre zéro et 10 degrés nord; deux minima principaux vers 60 et 70 degrés nord; enfin deux autres minima aux pôles. Ces minima secondaires vont en diminuant à partir de la première rotation et finissent par disparaître; les minima principaux s'éloignent progressivement de l'équateur et finissent par coïncider avec les pôles.

4° Aux pôles, les protubérances sont assez nombreuses et assez persistantes à l'époque des maxima secondaires, ainsi que dans les quinze premières rotations; mais ensuite elles deviennent très-rares et disparaissent complétement vers la fin de cette série. Les observations postérieures nous apprendront si ces phénomènes sont périodiques.

Les protubérances n'envahissent les régions polaires qu'aux époques où le Soleil manifeste une grande activité. Il est remarquable que dans ces mêmes régions, en l'absence des protubérances, la chromosphère possède souvent un éclat plus vif qu'aux autres points du disque; ces modifications se produisent sans doute d'après des lois que des observations postérieures nous apprendront à connaître.

En 1875, la chromosphère au pôle a été souvent très-haute. Peut-être ces phénomènes permettront-ils, avec le temps, de reconnaître si les variations du diamètre polaire signalées par les astronomes au commencement du siècle sont des réalités ou des erreurs d'observation.

5° Le maximum principal de fréquence des protubérances correspond à la région des facules et des taches; le minimum secondaire, situé dans les régions équatoriales, tombe dans la

partie du disque qui sépare les zones royales des taches et des facules. Les maxima secondaires correspondent aux limites des granulations que l'on a vues autour des pôles aux époques de plus grande activité. Cette apparition n'est pas constante : elles disparurent en 1873, et avec elles les protubérances. C'est dans cette même région que la couronne est plus élevée, ainsi qu'on l'a constaté pendant les éclipses.

Dans la IXe et la XIe rotation, nous voyons reparaître les protubérances polaires, mais elles durent très-peu : c'est une de ces fluctuations à courte période qui nous sont familières, mais dont la cause est encore un mystère.

6° Depuis la L^e^ rotation, les maxima reparaissent entre 50 et 60 degrés, et un maximum, peut-être relatif, existe pour les taches à cette époque. Elles ont fait défaut dans un hémisphère du Soleil pendant plusieurs révolutions de suite, mais nous ignorons encore si ce sera un minimum absolu (3 février 1876).

Un coup d'œil jeté sur les courbes de la *fig.* 207 fait apercevoir les nombreuses fluctuations que subit l'activité solaire dans les différentes régions de cet astre. Son atmosphère paraît constituer une enveloppe qui se conforme en vagues gigantesques portant le maximum d'activité tantôt dans une région, tantôt dans une autre : la direction dominante paraît être de l'équateur aux pôles. On connaissait déjà les fluctuations à longues périodes des taches en latitude : on les retrouve plus accentuées dans les protubérances. On peut apprécier par là la légèreté d'un critique qui a déclaré inexactes nos observations sur la distribution de la chaleur à la surface solaire, parce que M. Langley, en 1875, n'a pas trouvé la même distribution que nous avions signalée en 1852 [1],

(1) Voir *Atti della R. Accademia de' Lincei*. Roma, 2e serie, t. II, p. 656; 1875.

comme si le Soleil était un corps frappé d'immobilité absolue, et sans réfléchir que l'année 1852 était une époque d'agitation, et 1875 une époque de calme. Le savant astronome américain en a jugé autrement, et a reconnu qu'il est nécessaire d'attendre pour se prononcer. C'est par une sorte d'intuition bien justifiée, et nullement par défiance de nos observations, que nous disions, en 1852, qu'il fallait répéter ces observations, pour voir si les phases alors trouvées étaient constantes. Cette réserve prudente a été interprétée contre nous, comme si nous n'étions pas sûr de nos propres résultats!

Sans manquer de confiance dans les observations et sans faire tort aux savants qui s'en occupent, nous pouvons bien affirmer que les lois des oscillations de l'atmosphère solaire demanderont bien des années de recherches avant d'être fixées. Nous pouvons être heureux d'avoir ouvert ce grand horizon de recherches, et la Société spectroscopique peut être fière de les avoir inaugurées; mais, pour établir ces lois, il faudra une observation assidue, et, comme aucun observateur individuel ne pourra jamais s'y consacrer d'une manière continue, il sera nécessaire que ceux qui s'en occupent publient leurs résultats avec des figures détaillées pour être utiles à tous. C'est avec regret que nous avons vu un savant illustre déclarer que la publication des figures de la Société spectroscopique était désormais superflue! Sans cette publication, comment remplir les lacunes inévitables dans une station particulière? Comment éviter l'influence d'erreurs personnelles et les divergences provenant de la puissance inégale des instruments? Nous avons l'espoir que ce malencontreux conseil ne sera pas suivi; au contraire, nous comptons sur les observateurs des Indes et de l'Amérique pour combler les nombreuses lacunes qui parfois se rencontrent pour l'Europe entière, surtout dans certaines saisons.

§ V. — *Relations entre les hauteurs des protubérances et leurs latitudes.*

Les hauteurs moyennes des protubérances sont enregistrées dans le tableau C, p. 164, où elles sont distribuées d'après les rotations et les latitudes. Il est impossible de tirer de ce tableau des moyennes générales, car la hauteur est trop variable avec le temps. On peut cependant en déduire les conclusions suivantes :

1° Jusqu'à la fin de la Ve rotation, la hauteur moyenne est d'environ 7 unités, c'est-à-dire 56 secondes ; mais elle diminue rapidement pendant les rotations suivantes ; elle se réduit à 40 secondes environ et finalement à 32 secondes. Sur la fin, nous avons à peine à enregistrer de simples exagérations de la chromosphère.

2° La hauteur moyenne est toujours plus considérable dans les zones des maxima ; mais, dans les dernières rotations, où il n'y a point de protubérances polaires, on trouve des hauteurs très-considérables entre 30 et 40 degrés. C'est précisément à ces régions que correspondent les proéminences de la couronne observée pendant les éclipses.

3° Le tableau D, p. 166, résume ce qui concerne les protubérances les plus élevées, c'est-à-dire celles qui ont une hauteur au moins égale à 8 unités ou à 64 secondes. Le maximum correspond, dans l'hémisphère nord, à la région comprise entre 30 et 40 degrés ; dans l'hémisphère sud, à la région comprise entre 20 et 30 degrés. C'est à la IIe et à la IIIe rotation que se trouvent les nombres les plus considérables ; ces maxima diminuent ensuite tout en conservant leurs places.

4° Aux pôles, lorsqu'elles y sont nombreuses, les protubérances n'atteignent jamais des hauteurs très-considérables ;

celles de 8 unités (64 secondes) sont extrêmement rares; elles n'atteignent généralement pas 5 unités ou 40 secondes. Entre la Xe et la XIIIe rotation, époque où l'activité solaire allait en décroissant, la chromosphère présentait habituellement une élévation très-grande dans le voisinage des pôles; elle s'éleva souvent jusqu'à 3 unités ou 24 secondes. En 1875, la chromosphère en général est devenue très-basse; on a même annoncé qu'elle avait disparu, mais c'est une erreur : elle était seulement réduite à un filet sans flammes ni pointes, et, avec de bons instruments, les filets étaient très-bien visibles; cependant cette difficulté même de la voir, avec des instruments médiocres, tel jour, tandis que ces instruments la montraient tel autre jour, prouve assez qu'elle a varié. Nous verrons bientôt d'autres particularités curieuses de cette époque.

La hauteur des protubérances n'est pas proportionnelle à leur éclat. Cela tient, en général, à la nature des substances métalliques incandescentes, qui ont plus d'éclat que les gaz. Les protubérances les plus vives se trouvent dans la région des taches, et elles atteignent, durant les éruptions, des hauteurs considérables; mais on en trouve aussi de très-élevées, vers 40 degrés, où les taches sont rares. C'est dans cette région, voisine de celle des taches, que se produisent les hauteurs maxima pendant les périodes de tranquillité; de là la forme carrée de l'atmosphère solaire. Ces protubérances sont cependant peu lumineuses; elles ne présentent point les caractères des flammes d'éruption, et l'on n'y reconnaît pas la présence des métaux.

Lorsque les protubérances contiennent des vapeurs métalliques, ces vapeurs ne s'élèvent guère au-dessus de 60 ou 70 secondes : c'est l'hydrogène et l'hélium qui font les frais du reste. Les petites éruptions, environnées d'une chromo-

sphère très-brillante et hérissée de pointes, sont ordinairement très-riches en vapeurs métalliques; on ne les observe d'habitude que dans la zone des taches. Il y aurait donc lieu d'étudier les protubérances au point de vue de l'éclat lumineux : cet éclat est si grand quelquefois qu'on peut alors donner à la fente une largeur quatre fois plus grande qu'à l'ordinaire, et les voir même à travers les nuages.

§ VI. — *Étendue des protubérances en latitude et en longitude.*

Nous appelons *largeur* d'une protubérance le nombre de degrés qu'elle occupe en latitude héliographique. Nous avons dressé le tableau E, p. 168, analogue aux précédents, afin d'étudier le rapport qui existe entre la largeur et la distribution le long du méridien. Les chiffres représentent la largeur moyenne pour l'étendue de chaque 10 degrés, en degrés du périmètre du disque solaire.

Ce tableau, quoiqu'il ne soit pas très-détaillé, nous permet de formuler quelques remarques assez importantes.

1° Les régions où les protubérances sont plus nombreuses et plus élevées sont aussi celles où elles possèdent la plus grande largeur.

2° En moyenne, la largeur est double de la hauteur; car, ainsi qu'il a été dit, l'unité est ici le degré du périmètre, qui vaut environ 16 secondes; il ne faudrait cependant pas attribuer à cette loi une généralité qu'elle est loin de posséder, car il arrive souvent que des protubérances très-basses ont une largeur considérable.

Pour étudier d'une manière plus fructueuse ce qui concerne la largeur des protubérances, il fallait adopter une

méthode différente pour la rédaction du tableau. Pour cela, nous avons mis dans une même colonne toutes les protubérances dont la largeur n'atteint pas 10 degrés; dans une seconde, toutes celles qui sont comprises entre 10 et 20 degrés, etc., en marquant leur latitude et profitant pour cela des bords solaires qui sont publiés dans les planches de la Société spectroscopique. Les traînées qu'on y observe sont souvent de 20, 30 et même 50 degrés avec des interruptions très-petites; les plus grandes correspondent aux régions des taches, mais un peu plus vers les pôles. Ces grandes étendues étaient assez fréquentes au commencement de la série, mais, dans les dernières années, elles sont devenues très-rares. Lorsqu'on a rencontré une chromosphère assez vive et élevée de 24 secondes, on l'a marquée comme protubérance de hauteur n° 3. Ces cas sont compris dans le tableau E, p. 168.

4° La largeur, telle que nous l'avons définie, ne tient compte que de l'étendue en latitude héliographique. Quant à l'étendue en longitude, on ne l'a pas encore discutée numériquement; mais, en examinant les dessins publiés par M. Tacchini, d'après ses observations et les nôtres, il est facile de constater que les protubérances se suivent avec beaucoup de persistance sur un même parallèle, de sorte qu'elles occupent, en longitude, des arcs de 50, 60 degrés et même davantage. Les plus élevées et celles dont la structure est plus complexe occupent généralement une plus grande étendue. Nous avons cherché si elles présentaient une marche quelconque de déplacement en latitude, mais jusqu'ici sans résultat certain.

Pour étudier la distribution en longitude, nous avons tracé, pour toutes les rotations comprises dans nos tableaux, les courbes des aires que nous regrettons de ne pouvoir reproduire ici. Chaque rotation entière donne deux contours

complets du Soleil, l'un au bord oriental, l'autre au bord occidental. En combinant les observations faites sur chaque demi-circonférence, on aura un contour complet en quatorze jours. Nous avons pu constater ainsi que, pendant plusieurs rotations successives, les courbes présentent régulièrement des maxima et des minima aux mêmes points en longitude. Les maxima correspondent aux régions où les taches sont plus nombreuses. Il y a cependant des irrégularités remarquables; elles tiennent à ce que les protubérances se présentent souvent en grand nombre vers le 40e degré de latitude, où les taches sont assez rares.

Les protubérances que l'on observe aux latitudes élevées, en dehors de la région des taches, ne sont pour la plupart que de simples expansions filamenteuses de la chromosphère ; elles ne sont pas dues, comme celles qui se produisent dans le voisinage des taches, à de véritables éruptions de vapeurs métalliques venant de l'intérieur de la masse solaire. Leur présence commence à se manifester à la limite des zones royales, là où commencent les granulations moins vives à la surface de l'astre.

On doit comprendre qu'il est absolument nécessaire d'attendre de nouvelles observations pour établir des lois définitives. Les remarques que nous venons d'exposer ne sont qu'un simple échantillon du travail qui reste à faire dans ce vaste champ ouvert à l'activité des physiciens et des astronomes.

§ VII. — *Étendue générale ou superficie des protubérances.*

Un élément qui fait apprécier mieux que tout autre l'activité solaire, c'est la superficie apparente des protubérances.

J'entends par là l'aire occupée dans le champ de la lunette par la silhouette de leur contour. On ne peut prétendre la calculer exactement, la forme en est trop variable et irrégulière; mais, en prenant le produit de la hauteur par la moitié de la base, ce qui revient à les regarder comme triangulaires (ainsi que nous l'avons dit au § II), on peut avoir une approximation suffisante de cet élément, et, comme la base est évaluée en degrés de la circonférence solaire, dont la valeur linéaire est le double de l'unité qui mesure les hauteurs, il s'ensuit que le produit des deux chiffres donnés dans le tableau de la page 136 représente l'aire cherchée. Les résultats de ces calculs sont réunis dans le tableau F, p. 170.

Ce tableau conduit aux conclusions suivantes :

1° Les aires des protubérances présentent, aux différentes époques, des fluctuations très-considérables.

2° Les aires maxima correspondent aux régions où se trouvent les plus grandes hauteurs.

3° La grandeur des aires suit à peu près, dans ses variations, la même marche que les hauteurs, mais cette loi n'est pas encore bien claire : on peut dire, en général, qu'elles vont en croissant des pôles à l'équateur.

§ VIII. — *Relations entre les protubérances et les facules.*

Nous avons déjà parlé des relations qui existent entre les taches et les facules; nous nous occuperons dans ce paragraphe des facules et des protubérances, nous réservant de parler ensuite, avec plus de détails, des rapports qui existent entre les taches et les protubérances.

Nous avons étudié, sur les dessins que nous exécutons chaque jour, la distribution des facules, relevant avec soin

l'angle de position des parties brillantes qui se trouvaient près des bords. Nous avons résumé, dans le tableau G, p. 172, un certain nombre de nos resultats : l'unité de mesure est le degré de la circonférence.

Dans ce tableau, il est facile de vérifier les conclusions suivantes :

1° Les facules se trouvent condensées de part et d'autre de l'équateur; le maximum a lieu vers 20 ou 30 degrés de latitude; à l'équateur se rencontre un minimum relatif. On trouve aussi habituellement un minimum aux pôles. Ces faits étaient déjà bien connus, mais d'une manière trop vague.

2° Les maxima des facules en grandeur et fréquence coïncident avec ceux des protubérances; ils s'étendent cependant un peu plus vers les pôles. Ce fait est bien d'accord avec la remarque que nous avons déjà faite, que les facules et les protubérances vont toujours ensemble.

3° En examinant leur succession aux différentes époques, on voit d'un coup d'œil la grande diminution arrivée pendant les dernières rotations dans l'étendue qu'elles ont occupée sur la circonférence. Les régions polaires commencent les premières à être vides, et il n'en reste enfin qu'un nombre très-limité à droite et à gauche de l'équateur, avec un minimum secondaire sur l'équateur lui-même.

4° La fréquence diminue aussi avec l'étendue, et, au lieu de ces vastes nappes brillantes, il ne reste plus que de simples cercles ou ovales irréguliers et tranchant sur le fond général. La granulation est encore bien prononcée, et le réseau noir qui en forme la base paraît plus distinct; mais cet élément dépend trop des conditions atmosphériques pour être comparable à de longs intervalles. Les dernières colonnes font bien ressortir cette diminution considérable vers la fin de la série.

5° Nous avons déjà fait remarquer plusieurs fois que le minimum se trouve ordinairement aux pôles, mais ce minimum est loin d'avoir toujours la même valeur absolue. Dans les dernières rotations, il arrive absolument à zéro, tandis qu'il est assez élevé entre la IIIe et la VIe : dans ces périodes antérieures, les protubérances polaires étaient précisément très-développées, et elles formaient une couronne très-marquée autour des pôles. Elles étaient si tranchées, que nous les avons suivies pendant plusieurs rotations. Nous avons trouvé que les centres de ces couronnes ne coïncidaient pas avec les pôles de rotation de l'astre, et faisaient leur tour en vingt-cinq ou vingt-six jours ; de sorte qu'on aurait pu résoudre par elles la question de savoir si la vitesse de rotation du globe solaire se ralentit ou non près des pôles. Malheureusement elles cessèrent bientôt. A partir de la VIe rotation, ces couronnes, bien que toujours reconnaissables, sont devenues très-faibles, de sorte qu'on ne pouvait les observer que très-péniblement ; tandis que, dans la période que nous venons de signaler, elles frappaient les regards de l'observateur le moins attentif. Plus tard, elles ont complétement disparu.

6° Toutes les fois qu'une facule brillante arrive près du bord, s'il n'y a pas d'éruption proprement dite, on peut au moins constater que la chromosphère est plus élevée, plus vive, composée de masses cumuliformes et de petits amas brillants.

7° Il y a réellement deux sortes de facules : les unes sont tranchées, nettes, bien définies et brillent d'un éclat presque double de celui des environs : ces facules rondes et ovales ont souvent la figure de haricots ; les autres sont diffuses et mal terminées. Les premières seules sont celles qui se trouvent souvent percées de points noirs qui sont des rudiments d'éruptions. Elles se présentent seulement dans la région des

taches. Celles qui formaient les couronnes polaires étaient de la seconde espèce. Il y avait évidemment une relation entre elles et les maxima secondaires des protubérances observées à cette époque dans cette même région.

8° Nous avons calculé le rapport qui existe entre le nombre des facules observées et le nombre des jours d'observations. Nous avons trouvé que la moyenne diurne est assez variable, mais les maxima subsistent toujours d'une manière bien marquée entre la IIIe et la VIe rotation.

Ces observations dépendent beaucoup de l'état du ciel; mais, quelque peu favorable qu'il ait été en certaines circonstances, il n'a jamais pu introduire des erreurs considérables dans nos observations, vu surtout la précaution que nous prenons d'avoir sous le dôme une obscurité complète, afin de garantir l'observateur de toute lumière étrangère. Nos résultats sont donc incontestables, quoique les plus petits détails ne présentent pas la même certitude que pour les taches.

§ IX. — *Direction générale des protubérances.*

Les protubérances éruptives ne semblent suivre aucune loi relativement à leur direction. Les forces auxquelles elles obéissent agissent dans tous les sens; elles lancent ordinairement les jets lumineux dans des directions opposées, tantôt convergentes, tantôt divergentes, bien souvent spirales, à axe vertical ou horizontal. Il n'en est pas de même des protubérances qui présentent la forme de flammes et de panaches : ces masses exclusivement composées d'hydrogène, formées de filets paisibles, qu'on rencontre principalement dans les latitudes moyennes, au-dessus de 30 degrés, ont ordinairement

une direction bien déterminée. Nous avons voulu voir s'il y avait quelque chose de régulier dans cette direction; pour cela, nous avons fait une statistique de toutes les protubérances enregistrées depuis le mois d'août 1871 jusqu'au mois de décembre 1873. Voici le résultat de ce travail :

Première série.

Périodes et leur durée.	Protubérances ayant une direction définie — vers les pôles.	vers l'équateur.
Du 1er août au 31 décembre 1871...	+ 370	— 101
1er janvier au 23 avril 1872.....	+ 342	— 56
24 avril au 12 août............	+ 532	— 167
13 août au 31 décembre.......	+ 292	— 89
Somme............	+ 1536	— 413

Rapport : 3.72.

Deuxième série.

Du 1er janvier au 23 avril 1873......	+ 342	— 67
24 avril au 10 juin............	+ 114	— 43
11 juin au 31 décembre........	+ 240	— 110
Somme............	+ 696	— 220

Rapport : 3.16.

Il résulte de ce tableau qu'en moyenne il y en a trois et demie inclinées vers les pôles pour une tournée vers l'équateur. Mais, pour apprécier plus exactement cette conclusion, il faut tenir compte des faits suivants :

1° Les protubérances n'ont pas toutes une inclinaison déterminée; plusieurs sont droites ou accouplées deux à deux en sens contraire dans les tourbillons, et celles-ci ont été omises.

2° Aux pôles, les filets des panaches sont verticaux ou très-

légèrement inclinés ; quelquefois ils ressemblent à une pluie qui retombe verticalement. Cette disposition a été observée tant de fois que nous la regardons comme absolument incontestable ; elle est parfaitement d'accord avec la loi qui semble ressortir de la discussion précédente ; car, si les protubérances tendent vers les pôles, là elles doivent perdre leur direction définie dans un sens ou dans l'autre.

3° En considérant le nombre total des protubérances dans des périodes identiques, on remarque que la proportion des protubérances inclinées devient plus petite dans les dernières années, et le rapport des deux directions diminue un peu.

4° Vers la fin de l'année 1875 et au commencement de 1876, en même temps que les jets devenaient rares, leur direction a été très-incertaine, et la direction *droite* ou perpendiculaire au bord a dominé partout d'une manière frappante. Nous avons vu habituellement les filets s'élever perpendiculairement et arriver à une hauteur supérieure à 1 ou 2 minutes d'arc sans offrir la plus petite inflexion ! Cela a été remarqué aussi par M. Bredichin.

La conclusion qui résulte de ces faits est qu'il existe aux époques d'activité dans le Soleil des courants nombreux, mais dont la direction dominante est vers les pôles : les observations actuelles prouvent que ces courants disparaissent aux époques de calme.

Malgré l'évidence de cette conclusion, qui n'est que l'expression des faits, on l'a combattue avec vivacité ; mais les objections, loin de nous paraître fondées, nous ont semblé quelquefois inintelligibles. Ainsi l'on a été jusqu'à dire qu'on ne saurait définir la direction d'une protubérance ! Il nous est donc impossible d'écarter ces difficultés tant qu'elles ne seront pas formulées d'une manière plus facile à saisir. Quelques-uns de nos opposants n'ont jamais observé une

protubérance, et c'est ce qui fait leur excuse. D'autres n'ont jamais eu à leur disposition un instrument passable S'il s'agissait d'un cas particulier, on pourrait comprendre ces dénégations; mais, d'une manière générale, elles ne sont pas admissibles. En effet, il y a plusieurs causes qui peuvent expliquer certaines divergences : 1° les observations n'étant pas faites aux mêmes époques, le désaccord viendra de ce que la loi que nous avons indiquée n'est pas une loi persistante et universelle : elle peut se trouver en défaut pendant quelques jours; 2° la différence des instruments n'est peut-être pas sans influence : lorsqu'on emploie un grossissement trop considérable relativement au diamètre de l'objectif, on ne distingue plus nettement la structure filaire de certaines protubérances, et c'est surtout par la direction des filets lumineux qu'on peut, dans beaucoup de cas, apprécier l'inclinaison; 3° il peut y avoir quelque difficulté à s'orienter au moment de l'observation.

Du reste, M. Spörer et M. Bredichin, par des observations absolument indépendantes des nôtres, sont arrivés après nous au même résultat. Aussi, quoiqu'on puisse être en désaccord sur certains détails, la loi générale nous paraît incontestable. Le but principal qu'on doit se proposer maintenant, c'est de déterminer la durée de la période pendant laquelle oscille le phénomène.

On trouve même que la chromosphère s'incline d'une manière bien marquée vers les pôles, lorsqu'elle est régulière et qu'elle possède une élévation assez considérable. Dans la crainte d'être trompés par une illusion, nous avons comparé les dessins de M. Tacchini avec les nôtres : ces dessins, exécutés *au même moment*, étaient parfaitement d'accord en ce point; cette structure est donc bien réelle, puisqu'elle offre les mêmes apparences à différents observateurs.

La direction dominante des protubérances suppose qu'il existe, dans l'atmosphère du Soleil, à certaines époques, un courant systématique allant de l'équateur aux pôles; ce courant serait plus puissant aux époques où l'activité solaire est plus développée, tandis qu'aux époques de calme il serait souvent contrarié par un autre courant ayant une direction opposée, et même il manquerait complétement aux temps de calme. Il ne faudrait pas cependant comparer cette circulation avec celle qui a lieu dans l'atmosphère terrestre. Nos vents alizés forment un ensemble de courants et de contre-courants limités dans des zones nettement tranchées; nous n'avons encore rien observé de semblable dans le Soleil. Il paraît y avoir un courant unique et général. On sera plus disposé à admettre l'existence d'un tel courant si l'on se rappelle que les taches nous ont présenté une tendance générale vers les pôles (*voir* t. I[er], p. 162), et que les protubérances elles-mêmes laissent voir une marche vers les pôles dans les maxima secondaires.

Les observations sont encore trop peu nombreuses, elles embrassent une période trop courte pour que nous puissions formuler aucune loi définitive; nous ne pouvons que noter le fait. Il est d'autant plus difficile de découvrir ces lois, que le voisinage des taches et la violence des éruptions qui les accompagnent viennent souvent modifier la direction régulière. Nous avons fait nos observations à une époque où l'activité solaire était maximum, puis pendant la période suivante, où elle a été modérée, et enfin lorsqu'elle était très-faible : il reste à savoir si toutes ces apparences ne changeront pas ou si elles doivent continuer à se produire régulièrement. Aussi est-il intéressant de poursuivre ces observations, au moins jusqu'à ce qu'elles embrassent une période de onze ans.

Tableau A. — *Résultats des observations des protubérances et des taches solaires, du 23 avril 1871 au 11 décembre 1875.*

ROTATIONS.	COMMENCEMENT des ROTATIONS.	PROTUBÉRANCES.				TACHES.			
		NOMBRE TOTAL des protubérances dans l'hémisphère		NOMBRE des jours d'observation.	NOMBRE TOTAL divisé par le nombre de jours.	NOMBRE de groupes.	SUPERFICIE des taches.	JOURS d'observation des taches.	SUPERFICIE divisée par le nombre de jours.
		nord.	sud.						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	23 avril 1871	156	200	25	14,24	27	4237	26	162,9
II	22 mai	188	196	24	16,12	29	2080	26	80,0
III	19 juin	187	199	26	14,85	23	1727	26	66,4
IV	16 juillet	222	220	28	15,78	19	2546	28	90,9
V	13 août	174	200	25	14,96	22	3042	25	121,6
VI	10 septembre	123	140	18	14,61	20	1262	27	56,7
VII	8 octobre	92	108	14	14,28	22	1342	18	74,5
VIII	5 novembre	50	60	8	13,75	30	1021	17	60,0
IX	3 décembre	116	133	16	15,56	17	1079	18	63,4
X	1 janvier 1872	85	116	14	14,00	25	980	19	51,6
XI	27 janvier	109	123	17	13,65	27	2121	23	92,2
XII	25 février	107	109	14	15,43	20	1338	19	70,5
XIII	24 mars	76	81	13	12,07	28	1699	20	84,9
XIV	23 avril	110	109	18	12,16	20	2358	24	98,2
XV	21 mai	115	114	20	11,45	21	2762	27	102,3
XVI	18 juin	145	146	26	11,19	31	2648	27	98,0
XVII	16 juillet	161	194	28	12,68	26	2095	28	74,8
XVIII	13 août	140	147	25	11,48	28	877	26	33,7
XIX	9 septembre	68	88	15	10,40	19	1576	22	71,6
XX	5 octobre	65	64	14	9,21	18	1205	19	63,4
XXI	5 novembre	62	68	11	11,82	23	2803	21	133,5
XXII	4 décembre	48	62	9	12,22	17	1206	19	63,5
XXIII	1 janvier 1873	76	74	15	10,00	23	1332	20	66,6
XXIV	29 janvier	84	116	19	10,53	23	2659	23	115,6
XXV	26 février	53	77	15	8,66	19	2258	20	112,9
XXVI	26 mars	91	97	18	10,44	17	1338	21	63,7

XXX	13 juillet	105	124	27	8,48	16	1238	27	45,8
XXXI	9 août	53	52	18	5,83	11	811	27	30,0
XXXII	6 septembre	92	95	23	8,26	15	713	25	28,5
XXXIII	3 octobre	58	31	14	6,36	14	587	24	24,4
XXXIV	1 novembre	53	45	13	7,54	19	470	20	23,5
XXXV	28 novembre	63	57	15	8,00	16	795	23	34,6
XXXVI	26 décembre	59	52	16	6,94	15	882	21	42,0
XXXVII	22 janvier 1874	70	65	19	7,10	17	992	24	41,3
XXXVIII	19 février	75	65	16	8,70	16	823	24	34,3
XXXIX	18 mars	44	49	13	7,15	11	619	18	34,4
XL	15 avril	52	45	13	7,46	8	428	20	21,4
XLI	12 mai	53	54	15	7,13	18	411	21	19,6
XLII	9 juin	53	43	16	6,00	12	1053	24	43,9
XLIII	6 juillet	62	42	16	6,50	13	1855	28	66,3
XLIV	3 août	63	48	13	8,54	11	1267	21	60,3
XLV	30 août	92	71	19	8,58	13	300	22	13,6
XLVI	27 septembre	44	31	10	7,50	10	592	19	31,2
XLVII	24 octobre	57	58	17	6,77	8	344	19	18,1
XLVIII	21 novembre	17	18	7	5,00	7	216	11	19,6
XLIX	18 décembre	13	8	4	5,25	6	63	8	7,9
L	15 janvier 1875	40	28	13	5,23	7	147	17	8,6
LI	11 février	36	33	9	7,66	7	336	15	22,4
LII	11 mars	30	30	11	5,45	10	320	17	18,8
LIII	7 avril	30	25	10	5,50	8	577	19	30,4
LIV	5 mai	35	30	15	4,33	5	61	23	2,6
LV	1 juin	23	22	12	3,75	8	410	20	20,5
LVI	29 juin 1875	15	34	10	4,9		100	19	5,3
LVII	26 juillet	64	60	22	5,6	.	113	23	4,9
LVIII	23 août	72	59	18	7,3	7	100	24	4,2
LIX	19 septembre	29	24	7	7,5	5	75	13	5,6
LX	17 octobre	38	31	11	6,3	7	228	15	15,2
LXI	13 novembre	21	25	8	5,7	5	73	11	6,6
LXII	11 décembre	37	30	13	5,[illegible]	8	104	15	6,9

Tableau B. — *Nombre des protubérances distribuées par latitudes héliographiques.*

ROTATIONS.	HÉMISPHÈRE NORD.									HÉMISPHÈRE SUD.									NOMBRE total.		NOMBRE total divisé par le nombre de jours.	JOURS d'observation.
	90° à 80°	80 70	70 60	60 50	50 40	40 30	30 20	20 10	10 0	0° à 10°	10 20	20 30	30 40	40 50	50 60	60 70	70 80	80 90	N.	S.		
I..........	10	12	11	22	13	20	30	21	17	36	36	27	23	22	7	17	20	12	156	200	14,24	25
II..........	6	32	18	11	14	28	27	26	26	28	35	30	21	25	9	24	18	9	188	199	16,12	24
III.	16	23	13	8	21	26	27	24	29	24	30	26	26	19	12	15	35	12	187	199	14,85	26
IV.........	26	24	10	14	21	28	34	35	30	26	33	34	35	25	5	10	26	26	222	220	15,78	28
V..........	19	20	2	14	15	25	29	27	23	25	24	33	28	22	6	7	31	24	174	200	14,96	25
VI.........	12	10	3	5	15	19	18	20	21	17	21	23	19	13	5	6	22	14	123	140	14,61	18
VII..	14	8	5	2	11	15	12	15	10	14	17	21	11	10	6	3	11	15	92	108	14,28	14
VIII.	4	5	3	3	4	6	8	10	7	9	10	9	4	7	3	2	4	12	50	60	13,75	8
IX.........	11	8	8	8	11	15	18	17	20	23	22	20	16	13	8	3	13	15	116	133	15,56	16
X..........	3	7	9	4	9	12	14	15	13	15	19	23	18	13	11	3	8	6	80	116	14,00	14
XI..	13	8	5	4	12	11	21	18	17	22	14	24	20	11	9	8	4	11	109	123	13,65	17
XII........	6	7	8	10	14	17	17	17	9	19	22	15	17	9	11	5	4	7	107	109	15,43	14
XIII.......	1	4	4	7	7	15	14	11	13	12	16	17	14	5	8	2	4	3	76	81	12,07	13
XIV...... .	4	2	8	8	18	20	20	17	13	14	23	23	18	9	10	5	3	4	110	109	12,16	18
XV........	1	1	2	15	18	19	18	19	22	21	17	27	24	14	6	1	4	″	115	114	11,45	20
XVI.......	3	1	3	14	17	28	17	29	23	22	28	35	24	20	11	3	1	2	145	146	11,19	26
XVII.......	″	1	2	6	30	37	30	32	23	27	30	29	28	33	14	3	″	″	161	194	12,68	28
XVIII......	2	2	4	16	10	26	30	27	23	23	30	23	27	26	13	″	2	3	140	147	11,48	25
XIX	″	1	″	6	7	15	15	12	12	11	14	11	13	14	9	2	″	1	68	88	10,40	15
XX........	″	2	″	5	11	8	12	12	15	10	12	17	11	9	3	1	″	1	65	64	9,21	14
XXI.......	2	3	1	7	5	10	11	8	15	10	12	15	11	11	7	1	1	″	62	68	11,82	11
XXII	″	″	1	4	6	10	10	8	9	10	9	11	9	10	8	2	3	″	48	62	12,22	9
XXIII......	″	2	3	8	10	14	14	13	12	13	15	13	9	9	10	3	1	1	76	74	10,00	15
XXIV......	2	2	4	9	9	13	23	12	10	23	28	19	12	16	15	3	″	″	84	116	10,53	19
XXV	″	″	2	7	10	7	10	6	11	15	18	10	13	9	8	2	″	2	53	77	8,66	15
XXVI......	″	2	2	13	11	18	17	12	16	15	18	20	21	7	9	5	″	2	91	97	10,44	18
XXVII	″	″	[illegible]	7	10	20	17	9	15	13	18	24	13	12	8	4	″	1	87	93	10,59	17
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	″	67	73	8,18	17

[illegible]	//	[illegible]	[illegible]	10	10	[illegible]	27	21	16	18	16	11	12	[illegible]	1	//	//	//	53	52	5,83	18
XXXII.	//	2	7	9	8	13	25	16	15	23	22	14	22	7	4	2	//	1	95	95	8,26	23
XXXIII....	//	//	//	9	3	13	12	11	10	8	7	3	4	3	3	1	1	1	58	31	6,36	14
XXXIV. ..	//	1	2	3	7	8	8	14	10	12	11	4	12	3	1	//	1	1	53	45	7,54	13
XXXV.....	//	//	2	7	3	13	15	9	14	15	15	11	8	5	1	2	//	//	63	57	8,00	15
XXXVI....	//	//	3	7	8	9	14	11	7	12	14	12	9	3	//	1	//	1	59	52	6,94	16
XXXVII...	//	2	4	7	7	10	13	10	17	12	16	11	11	11	2	1	//	1	70	65	7,10	19
XXXVIII...	1	//	1	9	6	12	19	13	14	11	15	21	5	10	1	1	//	1	75	65	8,75	16
XXXIX....	//	//	1	2	5	11	11	6	8	10	11	9	5	9	3	1	1	//	44	49	7,15	13
XL........	//	//	2	6	7	12	4	11	10	9	11	7	9	8	1	//	//	//	52	45	7,46	13
XLI.......	1	//	3	9	6	9	9	9	7	9	17	11	3	11	2	//	//	1	53	54	7,13	15
XLII.	//	//	1	10	8	7	8	11	8	9	18	6	4	3	2	1	//	//	53	43	6,00	16
XLIII	//	//	1	7	6	10	13	14	11	11	12	9	2	4	2	2	//	//	62	42	6,50	16
XLIV......	2	1	3	9	6	7	14	13	8	5	14	6	8	9	6	//	//	//	63	48	8,54	13
XLV.......	2	//	4	12	9	17	20	16	12	11	11	18	12	10	6	2	1	//	92	71	8,58	19
XLVI......	//	1	//	7	6	8	6	6	10	4	9	9	4	2	3	//	//	//	44	31	7,50	10
XLVII.....	2	1	1	5	2	11	14	14	7	7	8	14	7	8	10	1	//	3	57	58	6,77	17
XLVIII....	//	//	//	1	3	3	2	4	4	4	2	4	1	3	4	//	//	//	17	18	5,00	7
XLIX......	//	//	//	1	4	3	4	1	//	3	2	//	2	1	//	//	//	//	13	8	5,25	4
L.....	2	1	//	6	7	6	4	7	7	1	8	7	5	2	5	//	//	//	40	28	5,23	13
LI.........	//	//	//	5	9	4	11	4	3	1	8	8	5	6	4	//	//	1	36	33	7,66	9
LII........	//	1	1	4	6	7	4	6	1	1	4	4	3	7	10	1	//	//	30	30	5,45	11
LIII........	1	1	1	5	4	1	8	7	2	1	4	5	1	5	9	//	//	//	30	25	5,50	10
LIV......	1	//	//	5	5	3	7	8	6	3	2	5	4	3	12	//	1	//	35	30	4,33	15
LV...... ..	//	//	//	7	3	4	4	1	4	//	4	2	3	3	9	//	1	//	23	[illegible]	3,75	12
LVI	//	//	//	3	2	1	2	4	3	3	6	4	4	4	11	//	1	//	6	100	5,3	19
LVII.......	//	//	3	13	6	3	14	13	12	3	11	3	5	3	30	2	1	2	5	113	4,9	23
LVIII......	//	6	6	18	6	10	8	12	6	3	7	9	4	11	18	6	//	1	7	100	4,2	24
LIX	1	1	1	4	5	4	4	4	5	1	//	3	5	7	5	2	//	1	5	75	5,6	13
LX	3	1	//	8	2	4	6	9	5	2	2	1	3	5	12	5	1	//	7	228	15,[illegible]	15
LXI	//	1	1	6	4	//	4	4	1	6	2	2	2	4	7	2	//	//	5	73	6,6	11
LXII.......	3	1	2	8	5	2	5	7	4	2	9	2	2	3	10	1	//	1	8	104	6,9	15

Tableau C. — *Hauteur moyenne des protubérances.*

ROTATIONS	HÉMISPHÈRE NORD. 90° à 80°	80 70	70 60	60 50	50 40	40 30	30 20	20 10	10 0	HÉMISPHÈRE SUD. 0° à 10°	10 20	20 30	30 40	40 50	50 60	60 70	70 80	80 90	HAUTEUR MOY. S.	N	MOYENNES.
I........	6,8	5,6	4,6	5,7	5,7	5,0	6,3	6,7	6,2	6,1	6,7	7,6	6,0	5,5	4,2	5,1	7,6	5,0	5,73	5,98	5,85
II.......	6,1	7,8	9,5	9,3	6,2	8,3	6,6	7,3	7,2	7,6	7,3	7,3	8,4	6,1	6,3	7,3	7,3	6,9	7,59	7,17	7,38
III......	6,7	7,0	6,0	7,7	8,1	7,5	7,8	6,6	7,0	7,3	6,6	8,7	8,2	7,4	5,8	6,7	6,7	5,8	7,15	7,02	7,08
IV......	5,2	5,7	6,2	6,8	7,1	6,2	7,4	5,4	6,1	7,0	6,5	6,6	6,8	6,0	4,8	5,5	6,6	5,6	6,36	6,15	6,25
V.......	5,3	5,5	4,5	5,6	6,2	7,6	7,7	5,5	6,1	6,1	6,5	6,9	7,6	7,6	6,9	4,9	5,9	7,3	5,99	6,63	6,31
VI......	4,6	4,6	3,0	4,7	5,1	6,2	6,2	5,5	4,7	4,6	6,2	5,7	5,5	6,4	4,2	4,1	5,5	4,9	4,95	5,23	5,09
VII.....	4,3	4,6	3,6	2,0	3,9	7,6	4,2	4,7	5,7	4,6	4,6	7,8	8,1	5,3	4,5	5,0	4,6	4,3	4,51	5,42	4,96
VIII.....	2,6	3,5	3,0	3,0	5,5	4,5	5,1	4,1	4,0	4,9	4,9	5,9	5,3	4,7	4,2	2,5	4,2	5,0	3,92	4,62	4,27
IX......	4,1	3,2	3,2	4,0	4,5	7,3	5,6	4,7	5,6	5,8	5,3	5,8	7,1	4,4	4,2	3,8	3,6	4,3	4,69	4,92	4,80
X.......	3,0	3,0	3,3	3,3	4,4	4,5	4,7	5,3	4,9	4,9	6,2	5,1	4,2	4,9	4,1	3,0	5,1	4,7	4,04	4,69	4,36
XI......	3,0	3,2	3,0	3,0	5,3	5,9	4,1	5,4	4,6	4,7	4,8	5,3	4,9	4,9	3,6	3,5	3,0	4,6	4,17	4,36	4,26
XII.....	3,7	3,0	3,1	4,9	6,8	5,3	6,7	5,1	5,3	5,7	5,0	5,8	6,0	4,3	4,0	3,0	4,0	3,1	4,88	4,54	4,71
XIII....	3,0	3,0	4,7	4,1	6,9	4,5	4,7	4,0	6,3	5,0	4,6	5,1	5,6	4,4	3,2	3,0	3,2	3,0	4,58	4,12	4,35
XIV.....	3,8	3,5	3,0	4,2	4,4	5,5	5,2	5,5	4,7	5,4	4,7	5,9	4,9	5,4	5,4	3,8	3,0	3,5	4,42	4,66	4,54
XV......	3,0	3,0	3,5	5,9	6,8	5,8	5,6	5,1	5,8	4,9	5,7	5,6	5,9	6,4	5,1	4,0	3,5	″	4,94	5,14	5,04
XVI.....	3,3	3,0	4,5	5,4	3,2	5,2	4,6	5,1	5,6	5,2	5,6	6,8	5,1	4,5	4,4	3,7	4,0	4,0	4,43	4,81	4,62
XVII....	″	3,0	3,5	5,2	5,6	6,3	4,7	5,0	4,9	4,7	4,9	4,8	4,9	5,1	4,1	5,0	″	″	4,77	4,78	4,77
XVIII...	3,0	3,0	3,6	4,5	5,8	5,5	5,4	5,1	4,8	5,0	5,9	5,5	6,4	5,5	4,5	″	4,5	3,5	4,52	5,10	4,81
XIX.....	″	3,0	″	4,3	11,8	6,8	4,7	4,8	5,3	4,6	4,9	6,1	5,4	5,6	5,0	4,0	″	4,0	5,81	4,95	5,38
XX......	″	3,5	″	6,5	5,1	6,4	4,9	6,7	5,4	4,7	5,4	5,6	5,8	4,3	6,3	4,0	″	4,0	5,50	5,01	5,25
XXI.....	3,5	3,0	4,0	4,7	6,9	5,1	5,6	5,2	5,7	5,4	5,9	6,0	5,8	5,4	3,6	3,0	3,0	″	4,85	4,76	4,80
XXII....	″	″	3,0	4,5	6,3	5,2	6,4	5,7	4,8	4,5	7,5	6,0	5,7	5,0	4,0	3,5	3,3	″	5,13	4,94	5,03
XXIII...	″	3,5	4,2	5,7	7,1	6,7	7,0	4,9	6,7	6,1	4,7	7,8	7,3	5,3	4,3	4,3	3,0	3,0	5,72	5,09	5,40
XXIV...	4,0	4,5	4,5	5,3	7,2	8,8	7,0	4,8	6,3	6,2	6,1	6,1	6,1	6,2	5,4	4,3	″	″	5,82	5,77	5,79
XXV....	″	″	5,0	7,2	6,2	6,6	7,7	5,7	5,4	7,6	6,4	5,9	6,5	5,7	5,6	5,0	″	4,0	6,25	5,84	6,04
XXVI...	″	4,0	4,0	5,0	5,0	7,4	6,1	5,7	4,8	6,0	6,7	6,2	8,1	8,0	5,4	4,2	″	3,5	5,25	6,01	5,63
XXVII..	″	″	4,1	5,8	5,6	5,8	4,9	5,4	5,7	6,4	4,9	5,7	4,9	4,5	4,8	4,2	″	3,0	5,33	4,80	5,06

XXX....	"	"	4,5	6,5	6,0	6,6	7,0	5,4	5,4	5,5	5,1	6,9	6,7	6,3	4,5	4,0	3,0	4,0	5,91	5,11	5,51
XXXI...	"	"	8,0	5,2	7,0	6,9	5,8	4,7	4,8	6,5	5,4	5,7	5,5	6,5	3,0	"	"	"	6,06	5,43	5,74
XXXII..	"	4,5	6,1	5,8	5,5	6,8	6,3	5,5	5,8	5,9	5,8	5,5	5,8	6,3	3,5	4,0	"	4,0	5,79	5,10	5,44
XXXIII..	"	"	"	5,5	5,7	6,5	6,3	5,7	5,3	5,5	6,3	5,3	4,8	4,7	3,6	4,0	5,0	4,0	5,83	4,80	5,31
XXXIV..	"	5,0	5,0	5,0	5,3	4,7	5,0	5,6	5,0	4,8	5,4	4,3	4,9	6,7	4,0	"	4,0	4,0	5,07	4,76	4,91
XXXV..	"	"	4,5	3,5	4,5	9,1	7,6	7,1	6,0	4,8	5,8	5,6	4,5	4,1	4,0	3,5	"	"	6,04	4,61	5,32
XXXVI..	"	"	6,3	5,2	6,2	5,3	6,3	5,1	4,9	5,0	6,1	5,6	7,2	5,2	"	4,0	"	3,0	5,61	5,15	5,38
XXXVII.	"	3,5	5,0	4,6	5,0	4,7	5,2	4,1	4,4	4,8	5,1	6,5	5,0	5,4	5,0	4,0	"	4,0	4,56	4,97	4,76
XXXVIII	4,0	"	4,0	4,8	5,3	6,3	6,8	6,5	6,0	5,4	6,4	5,7	4,3	4,6	4,0	4,0	"	4,0	5,46	4,80	5,13
XXXIX.	"	"	4,0	5,0	5,0	6,8	6,0	4,5	4,4	6,3	6,0	5,0	4,6	5,7	3,5	6,0	4,0	"	5,10	5,14	5,12
XL.....	"	"	6,0	6,3	5,1	5,8	8,0	6,1	5,5	5,7	6,8	5,4	5,4	4,8	4,0	"	"	"	6,11	5,35	5,73
XLI.....	4,0	"	5,0	6,3	5,3	5,2	6,5	5,4	6,0	5,3	7,4	5,4	6,5	5,5	5,0	"	"	4,0	5,46	5,55	5,50
XLII....	"	"	5,0	5,7	7,9	6,9	6,5	5,2	5,0	6,1	6,1	5,8	5,7	5,7	4,5	4,0	"	"	6,03	5,41	5,72
XLIII...	"	"	5,0	6,5	7,6	6,1	5,7	4,9	5,0	5,9	5,9	6,2	4,5	8,0	4,5	4,5	"	"	5,83	5,64	5,73
XLIV...	3,0	4,0	6,7	6,3	5,6	6,2	7,9	6,7	6,0	5,1	5,2	5,7	4,7	6,4	5,1	"	"	"	5,82	5,36	5,59
XLV....	3,5	"	4,2	6,2	6,1	6,3	6,9	5,5	5,3	5,5	5,0	6,3	6,7	7,1	4,6	4,0	4,0	"	5,50	5,40	5,45
XLVI...	"	3,0	"	6,5	6,6	5,9	6,3	4,0	4,6	6,7	7,3	6,1	5,5	7,0	5,5	"	"	"	5,27	6,35	5,81
XLVII...	4,5	3,0	6,0	4,8	4,5	6,0	6,7	5,6	5,1	6,1	4,8	5,4	5,6	4,9	5,6	4,0	"	3,0	5,13	4,92	5,02
XLVIII..	"	"	"	4,0	5,0	4,2	5,0	5,1	4,6	5,0	5,5	6,7	6,0	5,0	5,0	"	"	"	4,65	5,53	5,09
XLIX...	"	"	"	8,0	5,2	4,5	5,2	4,0	"	5,2	7,0	"	6,0	5,0	"	"	"	"	5,38	5,80	5,59
L.....	3,0	3,0	"	5,6	4,7	5,8	5,3	4,7	5,3	5,0	6,8	6,1	4,6	5,5	4,7	"	"	"	4,67	5,45	5,06
LI......	"	"	"	6,6	4,9	6,3	4,6	4,5	4,2	6,0	4,3	4,6	5,7	6,6	5,0	"	"	4,0	5,18	5,17	5,17
LII......	"	3,0	3,0	4,6	6,3	6,4	4,5	4,7	4,0	5,0	4,6	5,1	4,5	5,1	5,2	4,0	"	"	4,56	4,78	4,67
LIII.....	3,0	6,0	6,0	5,6	5,8	8,0	5,5	7,2	6,0	5,0	4,2	5,5	5,0	6,1	4,6	"	"	"	5,90	5,06	5,48
LIV.....	6,0	"	"	5,4	4,8	4,2	5,2	4,5	4,6	3,2	3,5	4,2	4,7	5,0	4,6	"	4,0	"	4,95	4,17	4,56
LV.....	"	"	"	5,0	4,7	4,2	4,0	5,0	4,0	"	5,0	4,5	4,5	4,7	4,6	"	4,0	"	4,48	4,55	4,51
LVI.....	"	"	"	5,2	4,0	6,0	4,5	4,8	6,0	4,0	4,7	4,5	4,8	4,6	5,8	"	5,0	"			
LVII ...	"	"	5,0	5,3	5,0	4,2	5,3	4,5	4,2	4,3	4,8	4,5	4,6	4,0	5,2	5,0	4,0	4,5			
LVIII....	"	4,2	4,5	6,5	5,3	4,9	5,8	6,2	4,4	4,7	4,1	6,0	4,7	6,0	5,4	4,2	"	4,0			
LIX.....	4,0	4,0	3,0	6,7	11,7	6,5	6,5	3,8	6,3	4,0	"	4,0	7,1	7,6	5,3	5,0	"	4,0			
LX......	5,0	4,0	"	6,8	7,0	6,7	8,1	4,6	4,3	6,5	4,5	6,0	5,7	5,1	4,8	5,0	4,0	"			
LXI.....	"	4,0	4,0	6,1	6,0	"	4,5	5,5	5,0	4,3	4,5	5,5	6,0	4,8	5,9	4,0	"	"			
LXII....	5,3	4,0	4,5	4,7	5,7	5,0	7,6	5,3	4,1	6,0	6,1	6,0	4,5	6,0	5,0	6,0	"	6,0			

Tableau D. — *Nombre des protubérances de 64 secondes et au-dessus.*

ROTATIONS	HÉMISPHÈRE NORD.									HÉMISPHÈRE SUD.									SOMME.		TOTAL.
	90° à 80°	80 70	70 60	60 50	50 40	40 30	30 20	20 10	10 0	0° 10	10 20	20 30	30 40	40 50	50 60	60 70	70 80	80 90	N.	S.	
I.......	6	4	2	5	3	4	11	6	3	13	13	9	6	5	"	2	11	2	44	61	105
II... ...	2	18	9	7	3	13	10	10	11	13	17	13	11	7	2	8	8	2	83	81	164
III......	5	13	2	5	12	14	15	9	13	7	11	16	15	6	2	4	16	2	88	79	167
IV.. ...	1	8	2	7	9	7	14	9	8	11	11	11	12	8	"	1	12	3	65	69	134
V.......	3	3	"	2	5	9	12	4	5	7	8	8	13	13	2	1	4	11	43	67	110
VI......	"	"	"	"	2	7	7	1	"	2	6	5	4	3	"	"	2	1	17	23	40
VII	"	1	"	"	"	5	1	2	2	1	1	7	5	1	"	"	"	"	11	15	26
VIII....	1	"	"	"	1	"	1	"	"	1	1	2	1	"	"	"	"	2	3	7	10
IX	"	"	"	"	1	7	3	2	3	7	4	4	7	"	"	"	"	"	16	22	38
X	"	"	"	"	"	1	"	2	"	2	7	3	1	3	1	"	1	"	3	18	21
XI......	"	"	"	"	2	2	1	3	1	3	1	3	1	2	"	"	"	1	9	11	20
XII	"	"	"	1	4	3	5	2	2	3	3	3	4	"	"	"	"	"	17	13	30
XIII	"	"	1	"	3	1	2	"	3	2	2	3	3	1	"	"	"	"	10	11	21
XIV.....	"	"	"	"	1	5	3	2	1	2	"	7	"	2	2	"	"	"	12	13	25
XV.....	"	"	"	4	4	5	2	4	2	3	2	2	7	4	1	"	"	"	21	19	40
XVI	"	"	"	2	1	3	3	3	6	3	7	13	3	"	"	"	"	"	18	26	44
XVII ...	"	"	"	1	4	6	1	1	2	1	3	1	2	3	"	"	"	"	15	10	25
XVIII ...	"	"	"	1	4	4	6	3	1	1	7	3	9	4	1	"	"	"	19	25	44
XIX	"	"	"	"	1	5	"	1	1	1	2	3	3	4	2	"	"	"	8	15	23
XX.....	"	"	"	1	1	2	2	4	3	"	3	2	2	1	"	"	"	"	13	8	21
XXI	"	"	"	"	2	1	3	"	1	1	2	4	3	2	"	"	"	"	7	12	19
XXII....	"	"	"	"	1	1	2	"	1	"	3	2	2	1	"	"	"	"	5	8	13
XXIII...	"	"	"	1	4	5	5	"	3	3	2	4	3	2	"	"	"	"	18	14	32
XXIV. .	"	"	"	"	2	7	7	1	3	7	5	5	4	4	2	"	"	"	20	27	47
XXV....	"	"	"	4	2	2	5	1	1	8	6	3	7	"	1	"	"	"	15	25	40
XXVI...	"	"	"	"	1	11	3	"	1	5	5	5	6	4	2	"	"	"	26	27	53
XXVII ..	"	"	"	1	3	3	1	2	3	6	1	6	1	"	"	"	"	"	13	14	27
XXVIII..	"	"	"	"	"	5	1	1	4	2	2	1	1	"	1	"	"	"	11	7	18

XXIX...	//	//	//	//	2	2	1	6	[illegible]	2	[illegible]	5	//	//	//	//	//	//	[illegible]	[illegible]	[illegible]
XXX....	//	//	//	2	1	6	11	4	2	2	1	5	7	2	//	//	//	//	26	17	43
XXXI...	//	//	1	1	1	6	1	1	2	2	1	2	1	2	//	//	//	//	13	8	21
XXXII..	//	//	//	2	2	5	6	4	4	2	4	3	4	2	//	//	//	//	23	15	38
XXXIII.	//	//	//	1	1	5	3	1	1	//	2	//	//	//	//	//	//	//	12	2	14
XXXIV.	//	//	//	//	1	1	1	1	//	//	2	//	1	1	//	//	//	//	4	4	8
XXXV..	//	//	//	1	//	7	3	3	5	1	3	1	1	//	//	//	//	//	19	6	25
XXXVI.	//	//	1	1	3	//	5	2	1	2	5	2	3	//	//	//	//	//	13	12	25
XXXVII.	//	//	//	//	//	//	1	//	//	//	2	3	1	1	//	//	//	//	1	7	8
XXXVIII	//	//	//	1	2	3	7	4	3	1	3	3	//	//	//	//	//	//	20	7	27
XXXIX.	//	//	//	//	//	6	4	//	//	4	3	//	//	1	//	//	//	//	10	8	18
XL....	//	//	//	//	1	1	3	2	1	2	5	//	1	//	//	//	//	//	8	8	16
XLI.....	//	//	//	3	//	1	2	1	1	//	8	1	1	1	//	//	//	//	8	11	19
XLII....	//	//	//	2	4	2	1	1	1	3	4	2	1	1	//	//	//	//	11	11	22
XLIII...	//	//	//	2	2	2	1	1	//	3	3	2	//	1	//	//	//	//	8	9	17
XLIV...	//	//	1	3	1	1	2	2	2	//	1	1	//	1	//	//	//	//	12	3	15
XLV....	//	//	//	4	4	7	8	2	1	2	1	3	3	5	//	//	//	//	26	14	40
XLVI...	//	//	//	3	1	2	2	//	//	2	6	5	1	1	//	//	//	//	8	15	23
XLVII..	//	//	//	1	//	1	4	3	1	1	1	2	1	//	2	//	//	//	10	7	17
XLVIII..	//	//	//	//	//	//	//	//	1	//	//	1	//	//	//	//	//	//	1	1	2
XLIX...	//	//	//	1	//	//	//	//	//	//	1	//	//	//	//	//	//	//	1	1	2
L......	//	//	//	1	//	//	1	//	//	//	2	1	//	//	//	//	//	//	2	3	5
LI......	//	//	//	2	//	2	1	//	//	//	//	1	1	3	//	//	//	//	5	5	10
LII......	//	//	//	//	2	3	//	//	//	//	1	//	//	//	1	//	//	//	5	2	7
LIII.....	//	//	//	//	//	1	1	2	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	5	//	5
LIV.....	//	//	1	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	(a)
LV......	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	1	//	//	//	//	1	1
LVI.....	//	//	//	//	//	//	//	1	1	//	//	//	//	//	2	//	//	//	2	2	4
LVII....	//	//	//	1	1	//	1	//	//	//	1	//	//	//	4	//	//	//	3	5	8
LVIII...	//	//	//	6	1	//	2	3	//	//	//	2	//	3	3	1	//	//	12	9	21
LIX.....	//	//	//	1	3	2	2	//	1	//	//	//	2	4	//	//	//	//	9	6	15
LX.....	//	//	//	3	1	1	4	//	//	1	//	//	//	//	//	//	//	//	9	1	10

(*a*) Dans cette rotation, il y a 15 jours d'observation, et aucune des protubérances n'arrive à 64 secondes.

TABLEAU E. — *Largeur moyenne des protubérances.*

ROTATIONS.	HÉMISPHÈRE NORD.									HÉMISPHÈRE SUD.									LARGEUR MOYENNE.		MOYENNES.
	90° à 80°	80 70	70 60	60 50	50 40	40 30	30 20	20 10	10 0	0° à 10	10 20	20 30	30 40	40 50	50 60	60 70	70 80	80 90	N	S	
I	6,8	7,7	5,5	6,4	5,6	6,3	7,3	5,5	5,5	5,3	5,9	5,2	5,4	5,4	7,2	6,8	6,3	7,7	6,29	6,13	6,21
II	4,0	5,5	5,3	5,2	6,8	5,9	6,3	5,3	5,6	7,3	6,4	4,9	5,8	4,7	5,8	5,7	7,1	4,1	5,54	5,75	5,64
III	7,3	6,1	5,7	5,2	6,6	6,8	6,4	5,6	5,7	6,4	7,4	7,1	7,3	5,8	7,3	7,0	6,4	5,3	6,15	6,66	6,40
IV	5,2	5,5	5,4	5,8	5,9	5,6	6,4	5,5	5,6	5,3	6,5	5,7	5,2	4,6	4,5	4,7	6,2	4,9	5,65	5,29	5,47
V	3,9	4,9	″	4,4	5,3	6,5	6,6	5,9	6,2	6,3	6,7	6,0	6,8	6,5	5,3	5,2	5,1	5,7	5,46	5,95	5,70
VI	4,1	3,9	5,0	6,4	4,8	6,0	4,6	5,6	5,4	4,7	4,4	6,7	5,3	4,8	4,1	2,9	5,1	4,1	5,09	4,68	4,88
VII	4,6	5,1	6,7	4,5	4,5	6,1	5,0	5,9	5,3	5,4	5,1	4,7	6,0	4,8	4,6	3,7	3,6	5,1	5,30	4,78	5,04
VIII	4,2	5,3	8,0	6,5	6,2	4,2	6,3	6,7	5,5	4,5	4,7	4,5	5,5	6,4	5,2	10,0	3,8	4,7	5,88	5,48	5,68
IX	7,2	8,4	5,3	7,1	5,4	6,5	6,2	7,7	7,5	5,5	7,1	6,7	6,8	5,3	5,6	4,5	6,2	4,4	6,81	5,79	6,30
X	5,5	8,1	5,7	4,0	5,3	5,6	6,0	6,8	6,6	6,1	6,5	5,7	5,4	5,4	5,5	6,5	4,8	3,8	5,95	5,52	5,73
XI	7,6	5,4	8,0	6,6	6,3	6,1	6,2	6,2	8,3	6,5	6,9	7,5	7,3	6,1	6,2	7,0	8,1	6,4	6,74	6,89	6,81
XII	8,0	8,5	8,5	7,7	6,7	6,7	6,9	6,1	4,9	7,5	6,4	7,1	5,9	6,6	5,1	8,0	5,0	7,3	7,11	6,54	6,82
XIII	10,0	6,3	6,0	5,7	7,0	7,1	7,7	5,8	6,9	7,3	6,3	7,1	5,1	5,4	4,9	5,5	6,0	6,0	6,94	5,95	6,44
XIV	5,1	7,0	10,0	6,1	6,7	5,8	6,2	5,9	6,2	7,6	7,4	7,9	6,0	6,5	6,1	8,2	8,7	4,5	6,55	6,99	6,77
XV	5,0	10,0	7,5	6,0	6,6	6,4	6,6	5,9	6,4	5,6	6,4	5,9	6,4	5,1	8,1	10,0	4,5	″	6,71	6,50	6,60
XVI	6,0	10,0	4,2	5,3	6,3	5,9	5,7	5,7	7,0	6,4	6,3	7,1	5,6	5,1	4,1	5,5	3,0	2,5	6,23	5,06	5,64
XVII	″	10,0	6,5	6,3	6,7	6,8	5,7	6,6	6,0	6,2	5,8	5,7	6,0	4,7	3,8	4,2	″	″	6,82	5,20	6,01
XVIII ...	10,0	7,0	5,8	7,4	7,2	6,7	6,7	6,9	6,3	5,6	7,2	7,1	6,6	6,6	4,2	″	4,0	7,0	7,11	6,03	6,57
XIX	″	6,0	″	7,0	4,9	7,0	5,6	7,5	7,8	6,8	6,3	7,6	4,9	6,3	4,7	4,0	″	3,0	6,54	5,45	5,99
XX	″	6,5	″	4,0	5,6	8,8	7,7	8,3	5,7	6,9	7,2	6,0	8,9	7,0	8,0	5,0	″	4,0	6,65	6,70	6,67
XXI	2,0	5,3	6,0	5,8	7,0	7,9	7,5	9,2	6,4	7,2	8,2	7,7	8,1	8,2	5,5	6,0	8,0	″	6,44	7,86	7,15
XXII	″	″	10,0	7,0	6,1	6,3	6,8	5,4	6,7	7,9	7,1	7,3	6,3	6,2	7,3	7,0	5,5	″	6,90	6,82	6,86
XXIII ...	″	9,0	6,5	5,8	6,4	8,9	7,5	7,5	7,7	6,6	7,5	8,2	6,6	6,3	7,5	6,0	3,0	10,0	7,41	6,85	7,13
XXIV ...	6,0	6,0	5,8	5,8	6,0	8,1	7,6	6,8	6,8	6,9	7,1	7,1	7,3	6,7	7,3	6,7	″	″	6,54	7,01	6,77
XXV	″	″	5,5	8,3	7,8	8,5	8,0	6,7	6,3	6,3	7,2	7,0	7,5	6,2	5,7	7,5	″	10,0	7,30	7,17	7,23
XXVI ...	″	6,5	3,0	5,5	6,0	7,7	7,2	5,4	5,7	7,9	6,8	6,5	6,5	6,3	5,6	3,5	″	6,5	5,87	6,20	6,03
XXVII .	″	″	4,5	5,7	6,8	6,3	6,2	7,5	6,7	7,2	7,5	7,3	6,3	5,7	5,9	5,5	″	5,0	6,24	6,31	6,27
XXVIII .	″	″	″	4,7	6,7	7,3	5,7	5,4	6,9	5,5	8,5	6,2	6,2	4,6	6,7	5,5	6,0	″	6,05	6,15	6,10

XXX	"	"	4,8	5,8	6,7	7,5	7,9	6,8	6,2	6,7	6,7	6,9	7,1	5,1	4,5	6,3	8,8	4,0	6,53	6,23	6,38
XXXI...	"	"	10,0	7,8	6,3	8,7	7,3	7,3	6,7	6,7	7,8	7,2	7,6	8,5	8,0	"	"	"	7,68	7,63	7,65
XXXII..	"	7,0	6,7	6,4	5,9	7,1	8,5	7,5	7,9	6,2	6,2	6,5	6,7	7,1	8,0	4,0	"	4,0	7,12	6,09	6,60
XXXIII..	"	"	"	5,9	7,0	6,9	6,6	6,1	6,9	6,6	7,2	5,5	8;7	5,3	7,2	4,0	4,0	3,0	6,56	5,72	6,14
XXXIV..	"	6,0	9,0	7,7	4,5	5,5	7,4	7,8	7,9	6,2	8,9	4,5	6,9	6,7	10,0	"	3,0	5,0	6,97	6,40	6,68
XXXV..	"	"	6,5	6,3	5,2	8,5	8,0	7,8	6,7	7,5	7,2	6,1	6,6	8,3	6,0	"	"	"	7,00	6,95	6,97
XXXVI..	"	"	5,0	7,7	7,2	8,5	8,0	9,0	6,4	5,6	6,2	7,7	6,1	5,2	"	3,0	"	10,0	7,40	6,25	6,82
XXXVII.	"	6,5	5,8	8,7	7,1	7,1	7,2	7,2	7,1	7,1	7,5	7,9	7,9	6,8	8,0	3,0	"	5,0	7,09	6,65	6,87
XXXVIII	10,0	"	3,0	5,5	6,0	6,2	7,3	8,2	6,1	8,5	7,2	7,2	6,5	5,7	10,0	3,0	"	3,0	6,54	6,39	6,46
XXXIX..	"	"	5,0	5,5	6,2	6,6	7,3	6,1	5,0	7,0	7,1	5,7	6,7	6,7	6,5	5,0	2,0	"	5,95	5,84	5,89
XL......	"	"	8,0	7,2	4,9	6,7	8,2	7,2	5,2	5,8	6,9	5,2	5,9	5,1	2,0	"	"	"	6,77	5,15	5,96
XLI.....	6,0	"	6,7	7,5	6,6	6,3	6,5	7,4	5,4	7,3	7,4	5,6	6,7	4,8	6,0	"	"	5,0	6,55	6,30	6,42
XLII....	"	"	8,0	8,5	8,5	7,5	7,5	6,4	7,9	7,2	8,0	6,9	5,0	7,0	6,0	6,0	"	"	7,75	6,58	7,16
XLIII...	"	"	8,0	8,5	7,4	7,0	7,4	7,4	7,0	7,0	8,1	7,0	6,5	5,7	5,5	4,5	"	"	7,53	6,33	6,93
XLIV...	10,0	5,0	6,7	6,5	5,0	7,4	7,1	7,2	6,7	6,1	6,3	7,2	5,0	6,6	6,2	"	"	"	6,84	6,23	6,53
XLV....	6,5	"	4,2	5,9	6,9	7,6	8,3	7,3	6,9	6,8	5,9	7,9	7,1	6,5	4,8	4,5	2,0	"	6,70	5,69	6,19
XLVI...	"	10,0	"	6,4	7,0	6,0	8,0	8,1	5,7	7,0	8,1	7,9	7,2	8,5	7,0	"	"	"	7,31	7,61	7,46
XLVII...	7,5	10,0	8,0	6,8	5,5	6,3	7,7	6,3	6,5	8,3	7,8	7,1	7,4	5,0	6,1	3,0	"	10,0	7,18	6,84	7,01
XLVIII..	"	"	"	2,0	5,0	6,5	5,0	7,1	6,3	7,2	5,5	6,2	7,0	5,0	6,1	"	"	"	5,31	6,16	5,73
XLIX...	"	"	"	5,0	4,2	3,7	7,0	7,0	"	6,5	8,5	"	9,0	6,0	"	"	"	"	5,38	7,50	6,44
L.......	10,0	10,0	"	5,6	6,2	5,0	7,8	5,1	7,0	6,0	6,3	6,5	4,1	7,5	4,2	"	"	"	7,21	5,76	6,48
LI......	"	"	"	6,2	5,7	8,0	5,3	3,8	5,2	10,0	5,2	5,1	5,0	7,3	5,5	"	"	2,0	5,70	5,73	5,71
LII......	"	2,0	5,0	8,0	6,6	7,8	3,5	7,8	5,0	3,0	5,0	8,1	4,5	5,5	6,8	8,0	"	"	5,71	5,11	5,41
LIII.....	4,0	10,0	6,0	6,6	7,8	8,0	6,7	6,5	6,5	6,0	4,5	6,1	8,0	8,1	5,4	"	"	"	6,91	6,35	6,63
LIV.....	5,0	"	"	5,1	4,6	4,0	5,7	5,8	4,5	5,2	4,0	4,8	4,5	5,5	4,5	"	2,0	"	4,95	4,35	4,65
LV......	"	"	"	5,5	5,7	5,2	4,0	4,0	3,5	"	5,0	5,5	5,5	6,2	6,1	"	3,0	"	4,65	5,21	4,93
LVI.....	"	"	"	6,2	4,5	7,0	6,0	8,1	6,5	4,7	6,6	5,7	5,6	5,0	5,6	"	4,0	"	6,38	5,31	5,82
LVII...	"	"	4,3	5,6	5,3	4,2	4,9	5,2	4,8	3,3	5,1	5,5	5,6	5,7	5,7	4,5	8,0	2,0	4,87	3,93	4,40
LVIII...	"	9,5	6,0	5,3	4,5	4,7	5,0	5,0	4,7	3,0	4,8	5,2	4,2	5,6	5,2	5,5	"	10,0	5,58	4,18	4,88
LIX.....	10,0	10,0	10,0	5,5	6,1	3,1	5,2	3,3	6,8	10,0	"	5,2	3,5	5,1	4,7	4,0	"	10,0	6,66	6,07	6,37
LX	1,7	2,0	"	5,6	6,0	3,5	7,8	3,9	3,3	1,5	7,5	5,0	3,7	2,6	4,4	4,7	2,0	"	4,22	3,92	4,07
LXI.....	"	2,0	10,0	4,8	5,5	"	1,7	5,5	4,0	4,7	3,5	5,0	3,5	4,3	4,2	4,0	"	"	4,78	4,17	4,48
LXII....	10,7	2,0	4,5	3,9	3,7	3,5	3,8	2,7	6,1	5,5	5,1	4,3	6,5	4,3	4,2	5,0	"	2,0	4,51	4,61	4,56

Tableau F. — *Aire moyenne des protubérances.*

Rotations.	Latitude nord. 90° à 80°	80 70	70 60	60 50	50 40	40 30	30 20	20 10	10 0	Latitude sud. 0° 10°	10 20	20 30	30 40	40 50	50 60	60 70	70 80	80 90	Somme. N.	Somme. S.	Total.
I	52,2	34,8	25,7	36,6	24,0	45,7	48,0	24,8	36,8	30,4	40,7	36,6	31,9	26,7	27,1	34,1	46,1	37,9	328,6	311,5	640,1
II.........	21,1	48,4	47,7	40,2	40,2	41,8	37,5	40,5	37,1	45,2	44,0	40,8	37,8	32,0	34,2	42,2	55,3	28,6	354,5	360,1	714,6
III........	51,2	44,1	31,2	42,2	52,1	51,6	52,5	37,2	34,0	39,4	42,0	57,0	66,8	47,9	49,8	41,5	47,3	29,2	396,1	420,9	817,0
IV........	26,9	30,3	36,5	44,9	50,7	34,4	41,9	32,3	41,1	36,1	42,4	32,5	36,7	30,3	21,6	26,0	43,3	29,7	339,0	298,6	637,6
V.........	24,4	27,7	//	29,3	32,3	41,5	45,1	32,9	38,9	38,4	42,0	35,6	53,4	49,3	34,1	29,0	30,8	45,2	272,1	357,8	629,9
VI........	15,2	21,2	14,5	31,3	29,6	34,1	32,6	23,6	24,7	20,6	30,2	33,3	29,1	33,0	15,6	13,3	26,9	24,8	226,8	226,8	453,6
VII.......	17,3	22,0	19,0	22,5	18,5	45,3	21,7	27,0	33,5	23,9	23,0	47,7	47,7	26,1	18,3	19,5	17,6	20,7	226,8	244,5	471,3
VIII.......	27,5	15,2	25,0	21,6	31,2	20,5	30,0	21,1	18,0	22,7	19,6	27,6	26,8	28,2	20,5	21,0	16,3	23,5	210,8	206,2	416,3
IX........	29,9	26,4	25,5	24,5	22,4	53,8	35,3	30,6	38,7	29,9	36,6	42,9	54,3	21,0	23,3	15,5	26,3	21,6	287,1	272,4	539,5
X.........	16,5	24,5	19,5	13,6	23,6	25,8	30,2	38,7	32,3	34,9	35,8	26,0	24,4	28,2	21,5	19,5	24,9	19,7	224,7	234,9	459,6
XI........	22,8	15,5	24,0	20,0	35,0	36,0	25,0	35,9	39,5	28,1	32,7	38,1	35,4	34,7	22,6	24,7	24,5	28,7	253,7	269,5	523,2
XII.......	29,1	25,5	26,4	36,7	50,6	35,6	47,6	30,1	28,8	40,2	34,8	41,4	38,6	29,2	20,6	24,0	18,0	22,3	310,4	269,1	579,5
XIII	30,0	19,0	25,0	22,8	50,5	31,8	36,8	22,8	48,7	35,2	29,0	38,6	28,7	21,8	15,4	16,5	18,7	18,0	287,4	221,9	509,3
XIV.......	23,7	24,0	30,0	22,4	32,2	36,1	36,2	36,9	33,0	41,9	33,8	43,7	31,7	45,7	37,2	26,0	15,0	15,5	274,5	290,5	565,0
XV	15,0	//	25,0	34,4	51,5	40,8	40,6	32,3	37,9	31,7	43,2	41,4	41,6	35,7	43,6	40,0	15,5	//	277,5	292,7	570,2
XVI	21,7	//	19,0	30,0	31,7	32,9	28,6	33,2	41,9	38,9	37,7	53,1	31,5	25,0	18,9	20,0	12,0	10,0	239,0	247,1	486,1
XVII.	//	30,0	21,0	32,8	41,1	49,6	28,9	33,5	31,2	31,0	29,9	27,9	32,0	25,6	16,2	23,0	//	//	268,1	185,6	453,7
XVIII.....	//	13,5	23,5	28,5	43,5	40,5	33,5	37,5	28,0	37,5	45,0	40,5	47,0	40,5	18,0	//	18,0	19,5	228,5	266,0	494,5
XIX	//	18,0	//	26,0	48,5	50,5	31,0	36,0	42,0	35,0	34,0	61,0	29,5	36,5	25,0	16,0	//	12,0	252,0	249,0	501,0
XX.......	//	10,5	//	18,0	32,5	57,0	38,5	52,5	27,5	36,5	35,0	36,0	42,5	32,0	63,0	20,0	//	20,0	236,5	285,0	521,5
XXI	8,0	21,0	8,0	26,5	46,0	42,0	41,0	49,5	31,5	40,5	37,0	48,0	61,5	57,5	22,0	30,0	24,0	//	273,5	320,5	594,0
XXII......	//	//	30,0	33,0	42,0	33,5	48,5	25,5	39,5	36,0	46,0	45,0	34,5	30,5	29,0	23,0	6,5	//	252,0	250,5	502,5
XXIII.....	//	31,0	28,0	38,3	40,2	56,9	41,8	36,3	46,2	37,0	36,7	60,3	33,9	33,9	31,9	30,5	9,0	30,0	318,6	303,2	621,8
XXIV.....	24,0	24,0	25,8	28,1	41,3	79,6	54,6	35,4	39,7	46,2	36,4	34,3	49,3	41,1	42,9	28,7	//	//	352,5	278,9	631,4
XXV......	//	//	27,5	60,4	51,6	51,3	60,4	37,9	35,6	45,5	44,3	38,7	48,2	34,1	34,8	37,5	//	30,0	324,7	313,1	637,8
XXVI.....	//	26,0	12,0	30,9	31,5	66,6	49,8	26,0	28,1	50,2	50,3	38,5	39,5	55,2	35,8	14,7	//	21,0	270,9	305,2	576,1
XVVII.....	//	//	17,5	44,0	45,0	32,5	29,5	43,5	35,5	53,0	37,0	40,0	30,0	25,5	30,0	22,5	//	15,0	247,5	253,0	500,5
XXVIII	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

XXX	″	16,0	20,5	36,0	40,5	47,5	46,0	38,0	42,5	40,5	33,5	50,0	45,0	37,5	19,0	33,5	27,0	16,0	287,0	293,0	580,0
XXXI.....	″	″	80,0	38,5	26,5	71,5	46,0	34,5	36,0	49,5	47,5	35,0	41,5	65,0	24,0	″	″	″	332,5	262,5	595,0
XXXII....	″	30,0	34,6	37,6	35,6	50,9	55,5	42,7	54,2	42,7	33,7	39,8	39,4	51,5	27,0	16,0	″	16,0	341,1	266,1	607,2
XXXIII....	″	″	15,0	42,5	38,0	50,0	47,0	31,5	38,5	33,5	50,0	27,0	21,0	23,5	26,5	″	20,0	28,0	262,5	229,5	492,0
XXXIV....	″	20,0	44,0	37,7	35,3	30,4	38,7	44,7	34,1	31,0	43,8	22,5	33,9	47,7	40,0	″	12,0	20,0	284,9	250,9	535,8
XXXV....	″	″	31,0	39,3	24,7	79,9	61,9	43,1	41,1	36,8	44,7	38,7	29,7	32,6	19,0	″	″	″	321,0	201,5	522,5
XXXVI....	″	″	30,0	41,8	48,5	45,8	53,2	46,4	32,7	29,2	40,5	45,1	53,0	29,5	″	12,0	″	30,0	298,4	239,3	537,7
XXXVII...	″	21,0	28,3	40,7	35,5	33,6	39,0	29,3	32,3	34,2	39,6	53,6	39,7	37,6	42,0	12,0	″	20,0	259,7	278,7	538,4
XXXVIII..	40,0	″	12,0	29,4	33,0	41,9	53,0	56,2	38,6	46,2	49,1	43,7	28,1	27,2	40,0	12,0	″	12,0	304,1	258,3	562,4
XXXIX....	″	″	20,0	30,0	32,1	46,5	44,7	27,8	23,6	44,1	37,0	30,8	32,8	38,6	21,0	30,0	8,0	″	224,7	242,3	467,0
XL........	″	″	48,0	46,3	27,0	35,8	64,5	44,1	30,0	35,9	50,2	29,1	34,3	26,1	8,0	″	″	″	295,6	183,6	479,2
XLI.......	40,0	″	33,5	48,2	36,0	33,5	45,8	40,8	32,2	40,5	59,5	31,9	43,0	27,2	30,0	″	″	20,0	310,0	252,1	562,1
XLII......	″	″	40,0	49,7	69,8	54,1	51,1	34,1	40,6	47,5	50,9	41,3	31,0	42,0	26,0	24,0	″	″	339,4	262,7	602,1
XLIII	″	″	40,0	57,2	60,3	45,6	45,4	37,5	35,6	44,3	50,5	45,0	30,0	51,0	26,0	20,0	″	″	321,6	266,8	588,4
XLIV	16,5	20,0	42,5	44,8	31,0	50,2	61,0	47,1	43,2	29,6	33,6	46,2	24,2	44,7	32,5	″	″	″	356,3	240,8	597,1
XLV......	21,0	″	17,7	40,4	45,8	54,7	58,7	41,7	37,9	38,6	30,7	52,0	52,5	52,3	23,5	18,0	8,0	″	317,9	275,6	593,5
XLVI	″	30,0	″	44,7	47,8	35,9	48,2	33,6	26,8	52,0	64,1	53,6	42,5	61,0	39,0	″	″	″	267,0	311,2	578,2
XLVII.....	30,0	30,0	48,0	35,2	25,0	43,4	55,1	37,1	31,6	53,8	38,1	40,3	41,2	25,5	36,9	12,0	″	30,0	335,4	277,8	613,2
XLVIII....	″	″	″	8,0	26,7	28,0	25,0	37,5	30,0	34,5	34,0	45,7	42,0	25,0	30,8	″	″	″	155,2	212,0	367,2
XLIX	″	″	″	40,0	22,5	17,7	36,2	28,0	″	34,0	61,0	″	54,0	30,0	″	″	″	″	144,4	179,0	323,4
L.........	30,0	30,0	″	38,3	26,7	40,3	41,6	28,3	37,5	30,0	51,1	40,0	23,3	40,0	20,0	″	″	″	272,7	184,4	457,1
LI	″	″	″	41,0	27,2	77,0	25,4	18,3	23,0	60,0	24,7	23,2	28,6	50,3	28,5	″	″	8,0	211,9	223,3	435,2
LII........	″	5,0	15,0	34,3	41,6	52,0	15,7	37,2	20,0	15,0	26,6	42,3	21,0	28,9	34,8	32,0	″	″	220,8	200,6	421,4
LIII.......	12,0	60,0	36,0	41,1	45,3	64,0	37,0	50,6	39,0	30,0	19,0	34,0	40,0	49,7	25,9	″	8,0	″	355,0	198,6	553,6
LIV.......	30,0	″	″	29,1	23,5	17,0	31,3	27,7	21,1	15,5	14,5	22,0	22,5	29,0	21,7	″	12,0	″	179,7	133,2	312,9
LV........	″	″	″	28,5	28,0	22,2	16,0	20,0	13,8	″	28,0	26,0	25,0	30,7	28,5	″	″	″	128,5	150,2	278,7
LVI	″	″	″	34,2	18,0	42,0	25,0	40,3	46,0	18,7	33,5	26,2	27,5	23,5	34,3	″	20,0	″	205,5	183,7	389,2
LVII	″	″	21,0	30,8	26,5	18,5	26,9	23,7	20,1	14,0	26,2	24,5	26,6	23,0	30,4	22,5	32,0	9,0	167,5	208,2	375,7
LVIII	″	39,0	25,7	36,4	24,7	22,6	27,6	31,0	20,4	13,7	18,7	34,7	19,7	35,7	29,6	23,0	″	40,0	227,4	215,1	442,5
LIX.......	40,0	40,0	30,0	42,5	62,3	23,5	35,5	11,6	44,6	40,0	″	21,0	26,0	38,4	26,6	22,0	″	40,0	330,0	212,0	542,0
LX	9,0	8,0	″	40,0	42,0	24,0	67,7	18,1	14,6	8,5	35,0	30,0	22,3	13,7	21,6	23,5	8,0	″	223,4	162,6	386,0
LXI.......	″	8,0	40,0	31,8	37,2	″	7,5	31,5	20,0	20,6	16,0	27,5	18,5	18,6	25,5	16,0	″	″	176,0	147,7	318,7
LXII......	32,7	8,0	22,0	19,9	22,1	17,5	29,0	14,1	25,6	33,0	32,2	42,0	30,0	28,7	21,3	30,0	″	12,0	190,9	229,2	420,1

Tableau G. — *Étendue des facules en degrés de la circonférence.*

ROTATIONS	LATITUDE NORD. 90° à 80°	80 70	70 60	60 50	50 40	40 30	30 20	20 10	10 0	LATITUDE SUD. 0° à 10°	10 20	20 30	30 40	40 50	50 60	60 70	70 80	80 90	SOMME. N.	SOMME. S.	TOTAL.
I	10,0	7,3	3,5	5,5	6,4	7,1	8,2	7,3	3,6	5,8	8,3	7,8	6,3	5,6	6,3	5,6	5,1	4,5	58,9	55,3	114,2
II	"	6,0	4,2	4,3	5,9	6,4	6,2	7,4	5,2	7,2	6,8	6,9	7,2	6,1	4,5	7,5	4,0	2,5	45,6	52,6	98,2
III	"	6,0	10,0	4,1	5,9	6,9	7,5	6,9	5,8	4,1	5,7	8,1	6,8	5,4	6,5	5,6	"	"	53,1	42,2	95,3
IV.....	5,0	5,1	5,3	4,2	4,9	6,4	7,7	7,5	6,0	3,6	7,2	8,5	6,9	5,3	5,0	4,9	5,0	4,7	52,1	51,1	103,2
V......	3,0	3,1	3,0	5,0	5,1	6,5	7,7	7,4	6,2	3,4	7,5	8,6	7,4	6,1	4,9	4,4	3,9	2,9	46,5	49,1	95,6
VI.	3,0	3,0	3,0	3,4	3,5	5,9	6,4	7,6	6,2	4,3	6,3	7,6	7,5	4,6	3,2	4,4	3,0	3,0	42,0	43,9	85,9
VII.....	3,0	2,8	2,8	2,7	3,9	5,0	8,0	6,4	6,8	5,2	7,4	8,0	8,8	6,2	4,0	3,0	3,0	3,0	41,4	48,6	90,0
VIII	3,1	3,0	4,7	4,5	3,4	5,3	7,2	8,1	3,3	2,6	7,4	5,4	6,6	5,0	3,0	3,0	3,0	3,0	42,5	39,0	81,5
IX	3,0	3,5	3,1	3,0	3,7	7,3	7,3	7,2	3,8	5,9	7,2	8,2	7,0	2,6	3,0	3,0	3,0	3,4	41,9	43,3	85,2
X.......	2,0	10,0	6,0	2,0	4,8	7,4	8,2	5,6	2,5	5,5	8,0	8,6	6,8	6,6	8,0	"	"	"	47,5	43,5	91,0
XI.. ...	5,0	"	4,5	2,2	5,4	7,8	7,6	7,9	4,8	5,5	7,9	8,0	6,2	5,2	1,0	4,0	10,0	6,0	45,2	53,8	99,0
XII....	7,5	3,0	3,0	2,0	5,7	7,2	6,9	5,5	4,8	6,5	8,0	7,3	6,3	4,5	3,0	"	5,5	"	45,6	41,1	86,7
XIII	5,0	5,0	4,0	5,7	6,2	6,2	7,2	5,9	3,3	7,4	7,0	7,5	4,8	5,7	3,0	8,5	2,0	"	48,5	45,9	94,4
XIV	"	10,0	"	5,2	5,7	6,8	7,2	7,2	6,3	4,8	8,5	7,0	5,0	4,7	8,5	5,0	3,2	5,0	48,4	51,7	100,1
XV. ...	"	"	"	"	3,5	6,7	8,2	7,5	7,2	5,9	7,1	7,5	6,2	4,0	8,7	7,5	3,0	"	33,1	49,9	83,0
XVI....	5,6	7,7	2,0	2,7	6,7	5,7	7,5	8,1	7,2	6,1	7,5	6,8	6,4	7,4	5,4	3,0	4,5	3,0	53,2	50,1	103,3
XVII....	3,0	"	"	7,0	5,6	6,8	7,0	8,1	7,9	6,2	8,1	7,6	5,9	5,9	5,7	10,0	"	"	45,4	49,4	94,8
XVIII...	"	"	"	8,0	3,8	3,8	6,8	6,5	7,1	5,8	8,0	6,7	6,1	9,5	4,5	5,3	4,0	5,0	36,0	54,9	90,9
XIX....	"	"	"	"	4,0	5,3	6,7	6,1	7,6	6,0	8,3	7,0	6,0	5,0	4,0	"	"	"	29,7	36,3	66,0
XX.....	"	"	"	"	3,0	7,0	8,5	6,8	6,9	6,5	8,6	8,6	7,5	8,6	8,2	10,0	3,5	"	32,2	61,5	93,7
XXI ...	"	"	"	"	5,2	7,1	8,3	7,8	6,1	6,2	8,0	5,7	7,0	5,0	"	"	"	"	34,5	31,9	66,4
XXII....	"	"	"	"	2,8	7,3	8,1	4,6	3,0	7,1	8,2	7,3	5,3	8,0	"	"	"	"	25,8	35,9	61,7
XXIII..	"	"	10,0	6,5	5,8	6,9	8,8	6,4	5,2	8,2	8,6	7,7	5,1	6,8	2,0	"	"	"	49,6	38,4	88,0
XXIV...	"	"	7,0	6,5	6,0	7,5	8,4	6,2	5,1	7,9	7,8	7,5	3,3	6,5	3,5	"	"	"	46,7	36,5	83,2
XXV....	"	"	"	4,8	5,5	8,1	7,5	5,6	3,8	8,5	6,8	5,4	5,5	"	"	"	"	"	35,3	26,2	61,5
XXVI ..	"	"	"	2,5	6,2	7,7	8,2	7,6	3,9	7,6	9,1	5,2	5,5	6,2	"	"	"	"	36,1	33,6	69,7
XXVII ..	"	7,0	10,0	7,5	4,1	5,5	7,5	6,5	6,2	7,9	9,1	5,7	6,0	9,0	"	"	"	"	54,3	37,7	92,0
XXVIII .	10,0	8,0	6,0	5,0	4,6	7,2	7,0	6,5	6,1	5,7	8,3	5,9	7,6	5,5	10,0	10,0	6,0	"	60,4	59,0	119,4

XXIX...	//	//	//	7,0	1,5	5,3	6,0	6,5	6,8	6,3	7,5	6,7	7,3	3,0	//	//	//	//	[illegible]	[illegible]	[illegible]
XXX...	//	//	//	//	5,0	5,3	5,8	6,7	5,4	6,1	6,9	5,4	3,5	7,0	1,0	//	//	//	28,2	29,9	58,1
XXXI...	//	//	//	//	//	5,0	4,3	8,1	5,3	6,1	8,2	7,1	4,6	//	//	//	6,0	1,0	22,7	26,0	48,7
XXXII..	//	//	//	//	//	4,0	3,9	7,9	5,5	4,4	6,2	7,5	6,5	4,2	3,0	5,0	//	2,0	21,3	38,8	60,1
XXXIII.	//	//	3,0	2,0	//	5,0	8,1	7,4	6,2	6,2	5,7	7,7	8,7	6,3	//	//	//	//	31,7	34,6	66,3
XXXIV.	//	//	2,0	3,0	//	4,0	5,1	7,5	8,1	7:7	7,0	5,6	2,0	//	//	//	//	//	29,7	22,3	52,0
XXXV..	//	//	//	//	10,0	3,5	6,3	7,4	5,8	5,7	7,8	4,2	3,0	//	//	//	//	//	33,0	20,7	53,7
XXXVI..	//	//	//	//	//	2,6	4,9	7,3	4,2	5,4	7,4	5,7	4,8	//	//	//	//	//	19,0	23,3	42,3
XXXVII	//	//	//	//	7,0	5,4	7,6	7,1	6,5	7,2	6,8	5,1	4,3	//	//	//	//	//	33,6	23,4	57,0
XXXVIII	//	//	//	//	3,0	5,3	7,5	8,1	6,2	5,5	6,6	5,3	3,0	//	//	//	//	//	30,1	20,4	50,5
XXXIX.	//	//	//	5,5	3,5	6,8	7,7	8,0	4,8	4,9	6,2	4,5	//	//	//	//	//	//	36,3	15,6	51,9
XL.....	//	//	//	//	5,0	4,3	5,8	5,2	5,9	5,3	5,2	6,5	4,2	//	//	//	//	//	26,2	21,2	47,4
XLI.....	//	//	//	//	//	4,0	5,6	6,7	5,2	8,0	5,6	5,3	7,0	2,0	//	//	//	//	21,5	27,9	49,4
XLII....	//	//	//	//	//	//	4,1	7,2	5,1	5,8	6,5	4,4	//	//	//	//	//	//	16,4	16,7	33,1
XLIII...	//	//	//	//	//	//	5,4	7,8	6,7	4,9	7,6	4,9	//	//	//	//	//	//	19,9	17,4	37,3
XLIV...	//	//	//	//	//	//	5,0	6,4	6,1	3,0	5,6	7,1	5,6	//	//	//	//	//	17,5	21,3	38,8
XLV....	//	//	//	//	//	2,5	5,4	6,0	4,7	5,4	5,3	7,1	5,0	4,7	//	//	//	//	18,6	27,5	46,1
XLVI...	//	//	//	//	//	1,0	4,2	6,5	4,1	4,9	7,1	6,6	8,5	//	//	//	//	//	15,8	27,1	42,9
XLVII...	//	//	//	//	//	//	3,0	6,9	4,4	3,7	6,5	7,0	2,6	//	//	//	//	//	14,3	19,8	34,1
XLVIII..	//	//	//	//	//	//	6,0	8,8	8,4	4,1	5,7	8,8	3,0	//	//	//	//	//	23,2	21,6	44,8
XLIX...	//	//	//	//	//	3,7	7,0	6,7	2,0	3,5	6,5	//	//	//	//	//	//	//	19,4	10,0	29,4
L.......	//	//	//	//	//	//	4,6	7,5	6,0	4,3	5,2	3,0	7,0	//	//	//	//	//	18,1	19,5	37,6
LI.....	//	//	//	//	3,0	6,5	5,6	5,7	6,8	6,5	5,6	//	//	//	//	//	//	//	27,6	12,1	39,7
LII.. ..	//	//	//	//	//	3,9	6,9	6,9	3,9	4,2	4,3	//	//	//	//	//	//	//	21,6	8,5	30,1
LIII.....	//	//	//	//	2,0	7,5	4,0	8,1	2,1	1,0	7,0	//	//	//	//	//	//	//	23,7	8,0	31,7
LIV.....	//	//	//	//	//	3,5	3,9	5,1	4,2	2,8	8,7	5,0	7,0	//	//	//	//	//	16,7	23,5	40,2
LV.....	//	//	//	//	//	//	6,0	4,9	4,6	4,6	5,3	1,0	//	//	//	//	//	//	15,5	10,9	26,4
LVI... .	//	//	//	//	//	//	8,0	5,4	5,9	2,5	7,0	//	//	//	//	//	//	//	19,3	9,5	28,8
LVII....	//	//	//	//	4,0	//	3,0	4,6	5,3	2,5	6,1	3,0	//	//	//	//	//	//	16,9	11,6	38,5
LVIII...	//	//	//	//	//	//	//	4,3	6,3	2,0	4,5	5,2	6,0	//	//	//	//	//	10,6	17,7	28,3
LIX.....	//	//	//	//	//	//	//	6,3	5,0	3,0	8,7	2,0	//	//	//	//	//	//	11,3	13,7	25,0
LX.....	//	//	//	//	//	//	3,2	6,4	4,5	6,6	4,0	7,5	//	//	//	//	//	//	14,1	18,1	32,2
LXI.....	//	//	//	//	//	//	1,5	6,5	4,8	4,3	4,7	6,0	//	//	//	//	//	//	12,8	14,0	26,8
LXII....	//	//	//	//	//	//	2,0	2,1	5,0	3,6	3,7	3,5	//	//	//	//	//	//	9,1	10,8	19,9

CHAPITRE VI.

RELATIONS QUI EXISTENT ENTRE LES TACHES ET LES PROTUBÉRANCES ET LE DIAMÈTRE SOLAIRE.

§ I. — *Exposition des faits.*

Nous avons exposé, dans le Chapitre précédent, un ensemble de faits que nous pouvons résumer de la manière suivante :

I. Les protubérances, les taches et les facules les plus brillantes, et surtout les éruptions, se produisent principalement dans les mêmes régions solaires.

II. Les maxima de ces phénomènes se produisent aux mêmes époques. Cette dernière loi cependant n'est vraie qu'avec quelques restrictions :

1° Le maximum des protubérances dure plus longtemps que celui des taches.

2° Cette coïncidence ne se vérifie que si l'on examine les durées entières de la rotation du Soleil; pour les observations individuelles, elle semble être en défaut, parce que les taches et les protubérances ne peuvent s'observer simultanément, les taches n'étant visibles que dans l'intérieur du disque, tandis qu'on ne peut suivre les protubérances que sur le contour.

De tous ces faits, nous devons conclure qu'*il existe une relation étroite entre ces deux ordres de phénomènes :* c'est cette relation que nous nous proposons d'étudier en détail dans le présent Chapitre.

C'est pour avoir les éléments nécessaires à cette étude que nous avons entrepris le lourd travail de dessiner chaque jour les protubérances sur la même figure où nous avons d'abord représenté les taches, nous écartant ainsi de la méthode plus facile, adoptée par les autres astronomes, de représenter par une ligne droite le contour apparent du Soleil. Nous pouvons ainsi, pour toutes les journées où le Soleil est visible, réunir l'un à côté de l'autre les deux ordres de phénomènes; nous pouvons voir les modifications qui se produisent dans la chromosphère lorsqu'une tache passe de la partie invisible à la partie visible du globe solaire, ou bien lorsqu'elle se rapproche du bord pour disparaître de l'autre côté. Nous avons publié en détail les résultats des observations les plus importantes pour l'époque comprise entre le 5 janvier 1869 et le 31 décembre 1872 [1]; plus tard nous avons fait la même discussion pour les observations de 1873; puis, dans le *Bulletin* de l'Observatoire, nous avons chaque mois donné une histoire des phénomènes solaires les plus importants. Ces longs détails seraient déplacés dans l'Ouvrage que nous publions en ce moment; nous renvoyons donc à nos Mémoires ceux de nos lecteurs qui voudraient les étudier, et nous nous contentons de résumer ici nos conclusions. Nous prions encore le lecteur de vouloir bien se rappeler ce que nous avons dit au Chapitre IV, § III, IV et V du Livre II, surtout aux pages 102 et 110-120 du tome Ier. Ce que nous allons ajouter ici sera comme le complément naturel de ce qui a été dit sur la structure des taches, sujet que nous ne pouvions épuiser alors, n'ayant pas encore tous les éléments nécessaires à nos conclusions.

---

(1) *Voir* les *Atti* de l'Académie Pontificale des *Nuovi Lincei*, séances du 19 janvier et du 30 mars 1873.

Parlons d'abord des relations individuelles qui existent entre chaque tache et les protubérances qui l'accompagnent; nous nous occuperons ensuite des phénomènes généraux.

I. Il faut distinguer les protubérances d'après la nature des substances qui les composent. Les protubérances uniquement composées d'hydrogène peuvent se produire sur toute la surface du Soleil, même dans les régions où l'on ne voit jamais de taches proprement dites. M. Trouvelot vient d'annoncer qu'il a observé des taches à peu de degrés du pôle : il ne donne pas la distance exacte, il l'estime à 10 degrés. Mais ces objets ne sont pas des taches véritables, ce sont des régions plus obscures de la photosphère qu'il appelle *taches voilées* [1] et que nous avons remarquées plusieurs fois, et même vues former de véritables cratères sans région absolument noire à l'intérieur (*voir* t. Ier, p. 113, vers la fin). Le maximum absolu de hauteur de ces protubérances hydrogénées est même en dehors de la zone des taches, et occupe la zone de 30 à 40 degrés de latitude héliographique. Il n'y a donc aucune relation directe entre celles-ci et les taches.

II. Les protubérances riches en vapeurs métalliques, c'est-à-dire les éruptions proprement dites, accompagnent invariablement les taches. Lorsqu'une grande éruption se manifeste au bord oriental, on peut être certain qu'une tache va apparaître, et on l'observe infailliblement le jour suivant. On peut être trompé dans cette attente par les éruptions moins considérables à cause de leur disparition rapide, jamais par les grandes. Sous le nom d'*éruptions,* nous ne désignons pas seulement les jets très-élevés, mais encore ces pointes basses, vives et roides dont nous avons déjà parlé; ces phénomènes

---

(1) *American Academy, Proceedings*, 12 octobre 1875.

sont les seuls permanents, tandis que les jets élevés ont une courte durée et peuvent passer inaperçus. Les jets de vapeurs métalliques sont toujours accompagnés d'une grande quantité d'hydrogène et de la substance qui produit la raie D_3.

III. Nous venons de dire que les éruptions métalliques se produisent dans le voisinage des taches ; la réciproque n'est pas toujours vraie, car on voit quelquefois des taches qui ne sont ni précédées ni accompagnées par ces éruptions. Il est cependant très-rare qu'elles ne soient pas précédées et accompagnées par des masses d'hydrogène incandescent et par des bouleversements très-visibles dans la chromosphère. Les taches rondes, que nous avons appelées taches *nucléaires*, sont celles qui se manifestent le plus souvent sans aucune protubérance ; quant à celles qui sont irrégulières, dont la forme annonce de grands mouvements et des bouleversements intérieurs, elles sont toujours accompagnées de protubérances contenant des vapeurs métalliques. Ces exceptions peuvent tenir à deux causes très-différentes :

1° Ces taches ne sont peut-être accompagnées d'aucun mouvement violent capable de donner naissance à des jets élevés.

2° Les éruptions étant des phénomènes essentiellement intermittents, il peut arriver qu'elles fassent accidentellement défaut juste au moment de l'observation.

La première de ces causes est confirmée par l'observation ; en effet, l'absence de phénomènes éruptifs se vérifie souvent lorsqu'elles disparaissent au bord occidental, après avoir donné des indices d'épuisement et de langueur. Les taches deviennent alors nucléaires, rondes et tranquilles, ne sont plus entourées d'aucun phénomène qui révèle une vive agitation dans la partie voisine de la chromosphère ; le calme le plus complet semble généralement régner autour d'elles

comme à leur intérieur, ou du moins, s'il se manifeste quelque mouvement, il est bien peu sensible. Il n'en est pas de même des taches qui sont en voie de formation ou du moins dans une période de grande activité à l'époque où elles se rapprochent du bord ; dans ce cas, on aperçoit *toujours* des mouvements considérables dans la chromosphère ; nous regardons l'assertion contraire comme une erreur.

IV. Les taches à noyaux multiples, irrégulières et déchiquetées, présentent, lorsqu'elles arrivent au bord, des flammes nombreuses ; elles sont souvent assez basses et peu étendues, mais l'ensemble est disséminé sur un espace considérable.

Nous avons été amené à énoncer ces conclusions après avoir

Fig. 208.



étudié et surveillé avec soin plusieurs centaines de taches à l'époque de leur entrée et de leur sortie. Nous avons constaté une relation étroite entre ces deux ordres de phénomènes même à l'époque où l'on n'avait pas encore pensé à élargir la fente du spectroscope ; aussi, dès les premiers mois de l'année 1869, avions-nous établi plusieurs de ces conclusions et surtout les suivantes :

V. Les raies de l'hydrogène sont très-vives et très-élevées dans le voisinage des taches, elles s'étendent quelquefois jusqu'aux noyaux, à l'intérieur du disque solaire (*fig.* 208), et les facules les plus brillantes qui précèdent les taches présentent des raies métalliques. Lorsqu'on eut introduit l'usage d'observer avec une fente plus large, les mêmes faits furent

observés et confirmés par nous, par MM. Respighi, Spörer, Tacchini, etc.

En reprenant cette étude avec plus de soin et en observant assidûment les plus petits détails, nous avons constaté que la formation d'une tache n'est pas seulement accompagnée d'une éruption d'hydrogène : il y a toujours quelque chose de plus, et nous pouvons affirmer avec certitude qu'aucune tache ne se produit sans être accompagnée d'une éruption métallique.

Les éruptions plus riches en sodium, en fer et en calcium correspondent à des taches plus noires et plus profondes en apparence.

Lorsqu'il s'agit de taches ayant une grande étendue, les vapeurs métalliques s'élèvent à des hauteurs considérables, 60, 70 et 90 secondes, rarement au-dessus; dans les cas ordinaires, les jets sont moins élevés, et prennent la forme d'amas brillants, de rayons, etc.; il est facile de les distinguer des protubérances ordinaires, rien qu'en examinant leur couleur et la vivacité de leur lumière, ce qui leur a fait donner par M. Spörer le nom de *flamboyantes*. Ainsi donc, lorsque nous parlons des éruptions qui accompagnent les taches, il ne s'agit pas de ces couches minces et difficiles à reconnaître signalées par M. Tacchini, mais de masses de vapeurs métalliques qui s'élèvent assez haut pour qu'on puisse facilement les remarquer. Et, en effet, lorsque les circonstances sont exceptionnellement favorables, on trouve toujours des traces de vapeurs métalliques dans la chromosphère et même dans les protubérances composées d'hydrogène lorsqu'elles sont un peu vives.

VI. Une chose importante à signaler pour la théorie des taches, c'est que l'étendue de la région troublée par une éruption est beaucoup plus considérable que celle qui est occu-

pée par la partie obscure du noyau et de la pénombre, et que tout autour règnent une multitude de facules. Cette remarque se trouve confirmée par le spectroscope, qui nous montre que l'étendue des jets métalliques est très-bornée en comparaison de la région troublée de la chromosphère, dont l'étendue est justement proportionnelle à la région occupée par les facules.

VII. Nous avons déjà distingué deux espèces de facules : les *brillantes* et *tranchées*, et les *diffuses* (Chapitre précédent, § VIII, 7°, p. 154). Les premières sont visibles même sur le bord et présentent quelquefois l'aspect de véritables proéminences, tandis que les autres ne se voient pas au bord, mais seulement à une petite distance. Or, lorsque ces facules très-brillantes se présentent sur le contour du disque, on trouve qu'elles sont le siége de grandes éruptions métalliques, et que les environs sont riches en protubérances hydrogénées.

Quant aux facules ordinaires ou diffuses, il arrive souvent qu'elles ne sont accompagnées d'aucune éruption, d'aucune raie métallique, mais simplement de protubérances composées d'hydrogène et de D_3. Réciproquement, on a souvent l'occasion d'observer des protubérances hydrogénées qui ne correspondent à aucune facule visible. Il est cependant certain que les deux ordres de phénomènes se produisent habituellement dans la même région, et qu'il y a entre eux une relation constante.

L'explication de cette anomalie n'est pas difficile. Nous venons de dire que les facules faibles ne sont pas visibles sur le bord solaire lui-même, mais seulement à l'intérieur du disque : par conséquent, si une protubérance hydrogénée se trouve superposée à une facule, celle-ci sera invisible, et il faudra attendre le jour suivant pour qu'elle paraisse sur le disque; mais nous connaissons la variabilité de ces jets, ils

peuvent s'évanouir pendant le trajet ou changer de place. D'un autre côté, une facule peut être visible près du bord occidental, mais, à moins que le jet ne soit très-élevé, nous ne pouvons voir la protubérance hydrogénée correspondante que lorsqu'elle arrive sur le bord. Or, dans cet intervalle, le jet peut encore changer et s'évanouir. Il est donc très-rare de pouvoir constater exactement la correspondance individuelle entre les jets d'hydrogène et les facules, et il faut se contenter d'une correspondance générale, dont l'existence est certainement aujourd'hui démontrée. En effet, les régions des facules un peu vives, lorsqu'elles arrivent au bord, fourmillent de jets d'hydrogène, et le contour des taches est là pour en fournir la preuve à tous moments.

VIII. Un point important à éclaircir, c'est de savoir si l'éruption a lieu sur les taches ou sur les facules. Pour répondre à cette question, il faut faire attention à plusieurs choses :

1° D'abord, l'éruption ne peut pas se définir directement, parce que généralement l'ouverture éruptive n'est pas visible. Si elle est sur le bord solaire, nous ne pouvons pas la voir, nous la verrons seulement quelque temps après, lorsque par la rotation elle sera entrée sur le disque : d'ordinaire cela demande l'intervalle d'un jour.

2° Or le trajet de l'ouverture ne se fait pas toujours dans une direction normale au bord, mais ordinairement suivant une ligne oblique et courbe, qui est la projection du parallèle solaire qu'elle décrit. Il y aura donc en général, le jour suivant, un changement dans l'angle de position, en supposant que l'éruption continue, ce qui est assez incertain. Ainsi, si l'on voit l'éruption en général, on n'en voit pas la source.

3° Je dis *en général*, car il peut se présenter le cas, très-rare à la vérité, qu'une éruption provienne d'une tache vi-

sible près du bord; mais alors elle doit être très-haute pour dominer tout l'espace qui sépare la tache du bord solaire et paraître en dehors du bord. Cela arrive souvent pour l'hydrogène (*voir* ci-dessus, III), mais très-rarement pour les métaux. Les éruptions sont souvent visibles au milieu du disque sur les taches, mais leurs caractères sont tout particuliers, et dans leurs détails elles doivent être interprétées d'après la théorie et ne peuvent servir à la fonder.

4° Le cas le plus fréquent, c'est que, lorsqu'on voit une éruption métallique sur une tache, ce n'est pas la tache visible qui en est la source véritable, mais une autre tache derrière elle qui la suit immédiatement et qui est invisible, parce qu'elle se trouve sur le bord. L'observation montre que telle est la disposition ordinaire. En nous fondant sur ces considérations, après une longue hésitation, nous nous sommes convaincu que *l'éruption métallique a lieu sur les noyaux des taches, et l'éruption hydrogénée sur les facules.* Cette conclusion ne doit pas être acceptée d'une manière absolue, et nous ne prétendons pas non plus que cette superposition soit invariable. Les jets métalliques sont mêlés d'hydrogène et projetés comme des arcs paraboliques, et alors il est difficile de saisir quel est vraiment le point de sortie et celui où ils vont se déposer.

Tels sont les rapports que l'observation révèle entre les deux grands phénomènes de la physique solaire : les taches et les éruptions; mais on peut ici se poser une question.

Nous avons souvent parlé d'éruptions, de jets lancés verticalement, etc., mais ne se pourrait-il pas que ces masses, au lieu d'être *lancées de bas en haut,* fussent aspirées d'en haut? En d'autres termes, on peut se demander si les protubérances ne sont pas produites par voie d'aspiration, par des trombes formées dans l'atmosphère qui existe au-dessus de la

couche rose; ou bien si elles sont dues à une poussée, à de véritables explosions, à des forces agissant dans l'intérieur du globe solaire et lançant au dehors des masses incandescentes plus ou moins considérables. Cette question touche à une théorie délicate qui nous paraît peu probable, mais elle semble au fond assez indifférente pour ce qui regarde le fait fondamental qui nous prouve que la matière monte. Même dans le cas d'une aspiration, les vapeurs métalliques sont certainement soulevées au-dessus du niveau général ; les faits que nous venons de signaler sont parfaitement certains, et nous procéderons plus sûrement en tirant de ces faits les conclusions qui en découlent avec évidence, afin d'en former une base rationnelle pour l'explication des taches.

§ II. — *Théorie des taches solaires.*

Nous sommes maintenant en état d'exposer nos idées sur la constitution des taches solaires.

Tant que l'observation des taches est restée limitée à l'examen des noyaux et des pénombres, la question n'a fait que peu ou point de progrès : c'était comme si l'on avait étudié une fabrique en n'examinant que son *plan* sans connaître son *élévation*.

On pouvait bien examiner les changements de forme, la distribution, les périodes d'activité et de calme, etc.; mais, étant toujours dans la plus grande ignorance sur tout ce qui se passait au-dessus d'elles, on restait sans renseignements sur leur origine et leur mode de formation. Si l'on risquait une explication, elle était purement hypothétique; ce n'était jamais ce que doit être une théorie physique, l'expression d'un fait bien constaté. Le spectroscope nous ayant révélé

l'existence des éruptions métalliques et le fait matériel de leur coexistence avec les taches, nous trouvons là un point d'appui solide, et la question se trouve actuellement ramenée à relier entre eux deux faits parfaitement incontestables l'un et l'autre, et à mettre en évidence les liens intimes qui les unissent.

La conviction à laquelle nous sommes arrivé après cette longue série d'études est celle-ci : *La tache est formée par la matière même que l'éruption projette sur le disque solaire; la région obscure est due à l'absorption exercée par les vapeurs qui sont sorties du sein du corps solaire et sont interposées entre l'observateur et la photosphère.*

Pour prouver cette thèse, nous ferons d'abord observer que, comme l'éruption se voit sur le bord, ainsi elle doit naturellement continuer quelque temps après, même lorsque la rotation du Soleil a porté sur le disque les points qui étaient sur le bord. La permanence de l'éruption est constatée par le fait que les raies lumineuses partent souvent des noyaux et vont rejoindre celles qui brillent hors du limbe lui-même.

Cette masse ainsi projetée se trouve alors placée entre la photosphère et l'observateur, et elle doit exercer une absorption élective selon la nature des gaz. Or de cette absorption nous trouvons une preuve évidente dans cette remarque, que nous avons eu souvent l'occasion de faire, que les mêmes raies qui sont brillantes dans les protubérances sont aussi celles qui deviennent plus sombres et plus larges dans les taches. C'est donc la même substance qui agit dans les deux circonstances; seulement, dans le premier cas, nous voyons le spectre direct, tandis que dans le second nous observons le même spectre renversé par l'absorption. C'est ainsi que les mêmes métaux, sodium, magnésium, calcium, fer, etc., qu'on observe plus habituellement dans les protubérances éruptives, sont aussi

ceux qui produisent à l'intérieur des taches la dilatation des raies noires (*voir* le Chapitre précédent, pages 93 et suivantes).

Ce point une fois admis, il est très-facile de concevoir comment une éruption peut donner naissance à une tache. La matière soulevée au-dessus du niveau général, par une cause ou par une autre, rayonne directement vers nous tant qu'elle est sur le bord oriental en dehors du disque et qu'elle se projette pour nous sur le ciel : c'est alors une protubérance. Mais la rotation solaire la déplace et l'amène en un point où elle s'interpose entre la photosphère et l'œil de l'observateur; elle doit alors absorber les radiations photosphériques, donner naissance à des raies obscures et diminuer l'éclat visible de la partie du Soleil sur laquelle elle se projette : c'est une tache; elle doit produire pour le sodium, par exemple, l'effet qu'on observe quand on brûle du sodium devant la fente du spectroscope dirigé sur le Soleil : les raies du métal paraissent diffuses et élargies sur le disque solaire. Comme la masse éruptive renferme un grand nombre de substances, elle doit absorber non-seulement les raies métalliques, mais aussi des rayons dans toutes les parties du spectre, et c'est ce qu'on reconnaît dans l'observation spectrale en voyant le champ de l'instrument devenir plus sombre dans la région correspondante.

Ainsi donc cette particularité fondamentale qui relie le phénomène des taches à celui des éruptions est parfaitement certaine, et elle est absolument indépendante des hypothèses que l'on émettra pour expliquer le soulèvement des masses éruptives. Telle est la partie essentielle de la théorie que nous voulons présenter; il ne reste plus qu'à rendre compte d'un certain nombre de détails que nous allons exposer aussi brièvement que possible, et, pour plus de clarté, nous donnerons les explications sous forme de questions et de réponses.

I. Comment se fait-il que les taches ne sont pas toujours

accompagnées d'éruptions? L'observation directe nous avait déjà appris, indépendamment de l'analyse spectrale, que chaque tache traverse dans son existence deux périodes bien nettement tranchées : la première est celle de la formation, où l'agitation est à son comble ; la seconde est une période de tranquillité et d'épuisement où les mouvements sont beaucoup moins violents. Cette seconde phase est surtout caractérisée par la figure ronde et l'aspect cratériforme que présente la tache.

Cette remarque rend facile la réponse à la question que nous venons de poser. Si une tache se présente au bord du disque pendant qu'elle est encore dans la période de formation et d'agitation, on devra constater l'existence de masses éruptives, tandis qu'il n'y aura rien de semblable si elle y arrive dans la seconde phase (n° IV du paragraphe précédent).

Mais nous pouvons compléter cette explication en entrant dans des détails plus circonstanciés. Dans les bouleversements solaires, comme dans les phénomènes que présentent nos volcans, après la première période de grande activité, où de grandes quantités de vapeurs sont lancées dans l'atmosphère, l'éruption continue d'une manière plus calme et sans mouvements violents ; puis l'orifice se ferme progressivement et complétement. Il y a donc une première phase plus ou moins violente qui lance la matière chromosphérique au-dessus du niveau ordinaire; elle est caractérisée par des tourbillons et par des jets paraboliques. A cette éruption active succèdent des émanations paisibles et tranquilles qui produisent des flammes, des amas brillants, des cônes et des rayons. L'observation prouve que ces éruptions moins violentes se manifestent de préférence au-dessus des taches rondes : parvenues à la période de tranquillité qui précède leur disparition, elles sont encore couronnées de facules:

mais, lorsque celles-ci disparaissent, les taches, en arrivant au bord, ne présentent plus que des flammes chromosphériques à peine visibles; quelquefois même on n'aperçoit rien qui ressemble à une protubérance. Enfin toute proéminence peut disparaître, car la nappe absorbante ne reste pas toujours suspendue comme un nuage dans l'atmosphère qui environne le Soleil; elle descend par son poids et s'appuie sur la couche brillante comme une masse d'huile sur l'eau : la masse d'huile forme dans la couche liquide située au-dessous d'elle une cavité dans laquelle elle semble reposer comme dans un vase : il en est de même de la nappe absorbante, dont le

Fig. 209.



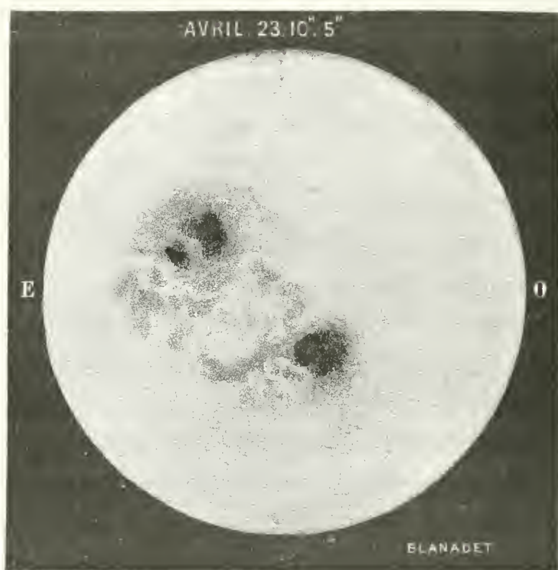
poids produit dans la photosphère une dépression bien marquée, une espèce de cuvette qui la limite et la contient, ainsi que cela se voit dans la *fig.* 209.

II. La seconde objection est plus sérieuse. De ce que nous venons de dire, il semble résulter que les taches devraient toujours être, comme les brouillards et les nuages, plus denses au centre et diffuses sur les bords : c'est ce que disait Galilée; or c'est précisément le contraire qui a lieu, car la ligne de séparation entre le noyau et la pénombre est parfaitement tranchée, ainsi que celle qui limite extérieurement la pénombre. Cette objection nous paraît facile à réfuter; mais avant tout il est nécessaire de préciser les faits.

Nous avons déjà fait observer (t. I, p. 289) que, si la limite entre le noyau et les courants qui envahissent l'intérieur de la tache est très-tranchée, il n'en est pas tout à fait ainsi de la limite entre la pénombre et la photosphère. Le spec-

troscope nous montrait les raies sur ces taches effilées près du bord de la pénombre extérieure; et, à mesure qu'on emploie de plus forts grossissements, cette limite devient toujours moins tranchée. La photographie est venue enfin confirmer cette remarque. Nous pouvons reproduire ici (*fig.* 210) la photographie d'une tache qui nous a été envoyée par M. Capello, de Lisbonne (23 avril 1872, à $10^h 5^m$).

Fig. 210.



A son bord extérieur, la tache est donc tout juste aussi tranchée que peut l'être une masse de vapeurs ou un nuage. Voici maintenant comment on peut se rendre raison de sa constitution intérieure.

Nous savons que les taches, qui sont irrégulières à la première époque de leur existence, se transforment progressivement; leurs noyaux sont souvent multiples, déchiquetés, de forme polygonale; ils se régularisent peu à peu et finissent

par devenir ronds et cratériformes. Nous avons vu quel est

Fig. 211.

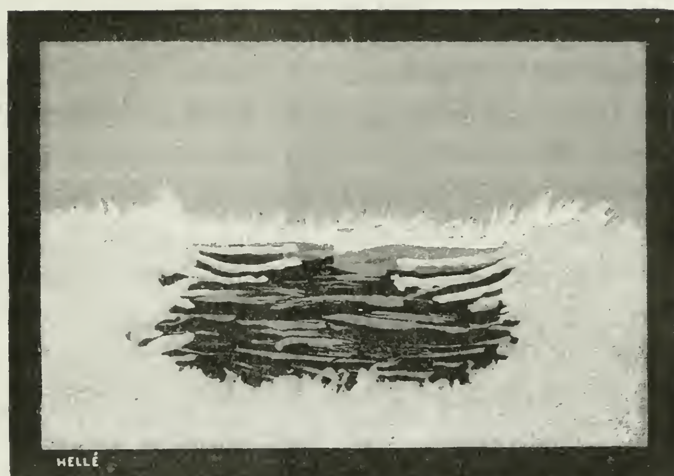


Fig. 212.



le mécanisme par lequel s'accomplit cette régularisation (*voir*

t. I, p. 82 et suivantes) : c'est un afflux de la matière photosphérique ambiante qui se précipite dans la cavité. Si cette cavité était vide, l'afflux aurait lieu avec une vitesse immense ; mais, la cavité étant remplie de vapeurs, celles-ci opposent une résistance au progrès des courants : cette résistance cependant n'est pas indéfinie. Ces masses ont été lancées en haut par l'éruption, elles se sont refroidies par leur dilatation, et aussi parce qu'elles sont arrivées à la surface extérieure libre qui rayonne vers l'espace. Dans l'intérieur de la tache, il y a donc une résistance venant de cette masse refroidie, et une autre qui vient de la force mécanique de projection, du dedans au dehors, que possède la matière lancée dessus. Cela explique le rebroussement des langues et le désordre des courants dans l'intérieur de la tache ; mais, lorsque l'éruption diminue d'intensité (au moins par intervalles), ces masses refroidies et plus lourdes commencent à descendre dans la photosphère, et alors celle-ci les envahit par ses courants, de sorte que la section verticale d'une tache serait à peu près représentée dans ces deux états par les *fig.* 211 et 212.

On avait conclu de ces particularités que le centre ou le noyau de ces taches était la bouche d'un cratère ; les observations spectrales nous ont amené à modifier en partie cette conclusion. Cet orifice doit être toujours invisible : 1° au bord du disque, car il est vu par une ligne tangente à son ouverture ; 2° au milieu du disque, car il nous sera caché par la masse même qui est rejetée. Du reste, quoique nous ne voyions pas l'orifice, nous voyons bien l'éruption elle-même, et le spectroscope la révèle par les raies brillantes de l'hydrogène et des métaux qu'on voit souvent dans l'intérieur des taches en grande activité. Le spectroscope nous prouve encore que le centre éruptif ne se trouve pas nécessairement dans le noyau même de la tache, il peut se trouver en un point quelconque

du voisinage. L'observation montre que les jets de matière chromosphérique existent souvent au-dessus des facules brillantes; nous avons vu combien il est difficile de constater d'une manière précise le point où se produit l'éruption. De plus, la matière rejetée peut être lancée obliquement, elle peut tomber loin de l'orifice (comme nous l'avons constaté tant de fois) et être transportée par les courants loin du centre d'émission.

Dans ces éruptions, il faut encore distinguer les jets d'hydrogène, qui en général ne forment pas tache, des matières métalliques. Nous voyons souvent une tache ayant à peine 1 ou 2 degrés héliocentriques de diamètre succéder à une éruption qui en occupe 6 ou 7; mais de cette grande étendue une petite portion seulement présente des jets métalliques. Nous pouvons donc être certains que les centres d'émission ne se trouvent pas uniquement dans les noyaux, mais qu'ils peuvent être dispersés dans le voisinage. D'après notre manière de voir, le noyau d'une tache est la région où la matière absorbante lancée par la force éruptive vient se placer entre l'œil de l'observateur et la photosphère du Soleil. Pour abréger, on peut bien appeler *nuage* cette masse de vapeur; mais, pour prévenir les malentendus, nous préférons le terme indifférent de *nappe*. Cette *nappe absorbante*, composée de matière éruptive, ne reste pas nécessairement et toujours tranquille et ramassée au-dessus de l'orifice d'où elle est sortie : les vapeurs peuvent être lancées dans toutes les directions et entraînées à de grandes distances. Nous avons vu plus d'une fois des jets paraboliques très-allongés occuper une étendue de 2 à 3 degrés, et même davantage; dans ce cas, nous pouvons assurer que les vapeurs vont se répandre à une grande distance de l'orifice d'émission. Le noyau est donc simplement la partie la plus dense et la plus absorbante de la

matière éruptive, ce qui cependant n'empêche pas qu'il puisse quelquefois correspondre au siége de l'éruption.

Lorsque les orifices d'éruption sont nombreux, il doit arriver que plusieurs jets de vapeur, issus d'eux, se réunissent de manière à former une seule nappe; de même, plusieurs nappes, d'abord séparées et irrégulières, peuvent se réunir en une seule nappe plus considérable, ayant en son centre une épaisseur ou une densité plus grande, ce qui constitue le noyau. Le spectroscope nous montre, en effet, ces jets multiples, et nous avons remarqué plus d'une fois que les grandes taches résultent souvent de la réunion d'un grand nombre de petites.

Donc, pour nous résumer en peu de mots, chaque tache suppose une éruption, de l'intérieur à l'extérieur, de matières gazeuses et métalliques. Tant que dure la période violente de l'éruption, les masses lancées se croisent dans toutes les directions, et elles sont mêlées de filets de matière photosphérique, qui constituent les courants et les ponts et donnent aux taches des formes bizarres et irrégulières : pendant cette période, les pénombres sont mal définies, et toutes les théories rendent également bien compte des phénomènes. Mais, lorsque cette première effervescence est apaisée, commence un double travail : 1° la masse projetée se refroidit par la dilatation qu'elle éprouve et par son séjour dans une région où la température est moins élevée; elle retombe alors, tend à se réunir et à s'enfoncer dans la photosphère, de manière à rétablir le niveau qui a été dérangé dans la période précédente; 2° il résulte de là un mélange de la substance gazeuse refroidie avec la matière photosphérique qui l'environne. Alors, au mouvement confus et désordonné de la première phase, succède un afflux plus ou moins régulier de la matière photosphérique qui se précipite sous forme de

langues pour aller remplir le vide dû au refroidissement des vapeurs métalliques : tel est, en effet, l'aspect que présente la pénombre, lorsqu'on l'observe avec un puissant instrument (t. I, *fig.* 47 et p. 92). A ce sujet nous croyons devoir reproduire (*Pl. I*) la belle figure de M. Langley, qui a exprimé d'une manière très-saisissante ces rebroussements et ces agitations déjà indiquées dans nos *fig.* 27, 28, 47, etc. Les constatations que M. Langley a faites au moyen de son puissant instrument sont venues confirmer nos propres descriptions (¹).

(¹) La figure de M. Langley, que reproduit la *Pl. I*, étant devenue célèbre et la base de certaines discussions, demande quelques explications. Elle représente une portion de la tache observée par M. Langley les 23, 24 et 25 décembre 1873. D'après ce que nous dit l'auteur lui-même (p. 193 du t. IX de l'*American Journal of science*, march 1875), « elle est appelée *tache typique*, car elle est moins un dessin exact de ce qu'on pouvait voir dans un moment déterminé, qu'un assemblage des divers types présentés dans leur connexion ordinaire. Le tout a été puisé dans les observations; mais, pendant que les détails de la photosphère environnante ont été suppléés par d'autres études, tout ce qui se rapporte au corps principal est la reproduction la plus exacte que je pouvais faire des formes de l'ombre et de la pénombre ».

Il est donc évident, d'après l'aveu de l'auteur, que le dessin n'a aucune prétention à reproduire un assemblage particulier, mais qu'il représente seulement le type général de la structure de la pénombre et des noyaux ou ombres. Après tout ce que nous avons dit dans cet ouvrage, les lecteurs ne seront pas surpris de cette structure. Seulement, grâce à la rare habileté de l'artiste astronome, la disposition des filets se trouve reproduite avec une admirable délicatesse; leur épaisseur, mesurée sur la figure, est de $\frac{1}{3}$ à $\frac{1}{2}$ seconde d'arc, et il ne faut pas s'étonner qu'avec une lunette plus grande (13 pouces anglais) on ait pu résoudre en filets plus minces ce qui, dans des lunettes moindres (9 $\frac{1}{2}$ pouces), paraît une seule masse homogène. D'ailleurs, abstraction faite de la force de l'instrument, nous avons bien souvent déploré de ne pouvoir reproduire exactement la délicatesse et la complication de ces formes, mais un tel travail, s'il peut se faire pour un essai particulier, serait impossible pour toutes les taches, le temps nécessaire pour cela manquant absolument, et la photographie n'en saisissant rien. Les têtes des filets, grossies et souvent rebroussées, sont parfaitement ce que nous avons tant de fois signalé (t. I, *fig.* 47, et p. 92, 88 et 62). Cette espèce de chute, semblable à celle que présentent les crêtes des vagues d'une mer agitée, et que le ton du dessin fait admirablement ressortir, est très-bien prononcée, et nous voyons avec plaisir confirmé ici ce qui nous avait été contesté (*voir* t. I, p. 83). L'habileté du dessinateur atteint vraiment à l'idéal que l'observateur se forme en regardant ces phénomènes que seul un artiste astronome peut reproduire. Ce dessin confirme donc d'une manière saisissante ce que nous avons tant de fois signalé, ce qui poussait M. Schiaparelli à nous écrire

III. Mais, dira-t-on, dans cette prétendue fusion, comment pouvons-nous comprendre la constitution de ces langues isolées, parfaitement définies?

1° Pour s'en rendre compte, il suffit de se rappeler quelques

---

ces mots d'encouragement : *Quel disegno di Langley ha illuminato molte menti prima restie, sebbene non vi sia niente che V. S. non abbia gia descritto molte volte... Mi congratulo che questa giustizia le sia alfine resa, in verità molto tardi!* (Milan, 21 avril 1875).

Cependant M. Langley et d'autres ont prétendu que ce dessin présentait des phénomènes incompatibles avec notre théorie des taches. M. Langley ayant trouvé, par des procédés optiques (dont il a gardé le secret) que non-seulement la pénombre est rayée, mais encore l'ombre ou le noyau, croit cette structure inconciliable avec la supposition que, selon lui, nous aurions faite, que le noyau est une espèce de cuvette pleine de vapeurs stagnantes (*a stagnant pool*) et absorbantes, car les filets y accusent un mélange et un mouvement de couches superposées et agitées qui contrastent avec notre théorie.

Nous sommes vraiment étonnés de voir qu'après avoir tant de fois insisté sur les éruptions comme la véritable origine des taches, on vienne nous attribuer l'étrange idée du « marais stagnant ». Mais nous comprenons très-bien ce qui a donné lieu à cette inadmissible supposition. Nous avons dit que dans certains cas (p. 187) et dans *la période de* CALME et de clôture des taches, les masses des vapeurs s'accumulent dans ces cavités en s'y enfonçant, et qu'elles sont envahies par les courants de la photosphère environnante. Cette condition de choses, toute particulière à *une phase déterminée* de la tache, a été étendue par M. Langley et d'autres à toutes les phases possibles, et c'est là sans doute l'origine de cette erreur. Du reste nous avons bien souvent remarqué ces filets plus clairs, contournés et tourmentés dans l'intérieur même des taches (*voir* t. I, p. 96 et suiv., et *fig.* 44, 45, etc.).

Or il arrive réellement que la tache examinée par M. Langley est dans une période tout à fait différente du calme; au contraire, elle se trouve au maximum de son paroxysme d'éruption, et peut être comparée à la tache de la *fig.* 27 et 28 (t. I, p. 62). Pour en convaincre le lecteur, il suffira de rapporter ici l'histoire de cette tache, que M. Langley n'a pu observer complétement à cause du mauvais temps, mais que nous avons suivie, favorisé par un ciel clair. La tache fut observée par nous la première fois le 20 décembre, assez près du bord oriental; elle était formée de deux groupes séparés, l'un composé de trois petits points, l'autre de trois petites taches encore légèrement séparées : la superficie apparente était de 29 unités. On lui assigna le numéro d'ordre 192. Le jour suivant, il n'y eut pas d'observation. Le 22, le premier groupe s'était transformé en une tache ronde à trois noyaux séparés, disposés en triangle, et l'autre groupe dans une tache ronde à noyau simple; les deux parties étaient jointes par une chaîne de pores et de points. La superficie fut évaluée à 41 unités. Le 23, le changement était énorme; la superficie était doublée (79 unités). La première partie avait un grand noyau, divisé par un pont très-large; la seconde (orientale) paraissait une grande fente, comme une bouche béante ayant les lèvres rapprochées au milieu; une pénombre très-tourmentée et irrégulière la contournait, dont le bord boréal présente une grande similitude avec le dessin de M. Langley. La chaîne des pores était élargie; alors les changements se succédaient à vue. Le 24, tout



del. *Fuler imp* *sc.*

phénomènes analogues de la Physique terrestre. D'abord les filets et les courants n'ont pas des dimensions *infinitésimales;* ils ont une largeur de $\frac{1}{3}$ ou $\frac{1}{2}$ seconde et souvent de quelques secondes, c'est-à-dire de plusieurs kilomètres. Leur limite

---

était si changé de nouveau, surtout dans la partie orientale, qu'on n'y reconnaissait presque rien des apparences de la veille. L'axe de la grande fente s'était incliné; il n'y avait plus de stabilité; deux dessins faits *par projection*, à moins d'une heure d'intervalle, par le P. Ferrari et par moi, ne se ressemblaient point dans la forme de l'ombre, tant les changements étaient considérables; la superficie atteignait 104 unités. En regardant dans un miroir le dessin de M. Langley, il n'est pas difficile d'y reconnaître le contour général de notre dessin, mais la différence des temps est trop grande pour prétendre à une ressemblance.

Le 25, le tout était plus différent encore. La chaîne de petites taches qui réunissait les deux principales s'était dilatée, et la seconde partie de la tache était divisée par des ponts et représentait à peu près et grossièrement un masque; la première avait quatre noyaux alignés et parallèles à l'équateur solaire. La superficie dépassait 125 unités. La fragmentation et les divisions continuèrent encore le 26, et la seconde partie présentait des noyaux serpentants; la superfice était de 105 unités.

Ainsi continua l'agitation et la subdivision jusqu'au 27, où les deux parties étaient tellement réunies ensemble par les petites taches innombrables que la surface présentait une seule masse de taches de l'étendue de 125 unités. Il est remarquable que dans la première partie la ligne joignant les quatre noyaux avait tourné de 90°. Cette complication, impossible à décrire sans figures, dura jusqu'au coucher de la tache, qui eut lieu le 30 et le 31, jours où le bord présenta un grand nombre de petites éruptions s'étendant sur un arc de 29 degrés du bord solaire.

Nous avons voulu rapporter l'histoire de cette tache, afin de prouver que les observations de M. Langley tombent précisément dans une période de crise la plus violentes où nous savons que les éruptions bouleversent tout, où nous avons les tourbillons de toute espèce (*fig.* 27), et à propos de laquelle il serait sans doute absurde de parler de « marais stagnant ». Dans ces occasions, les noyaux sont formés par les amas éruptifs des vapeurs métalliques absorbantes plus denses, et l'on conçoit sans difficulté que ces vapeurs soient agitées et contournées en spirales, en filets minces, et mêlées même de parties brillantes qui échappent à l'absorption. La supposition que tout ce bouleversement puisse avoir lieu dans un *plan unique* ne peut même pas se présenter à l'esprit. Ainsi nul doute que les courants mêlés et agités se superposent de toutes les manières, et que le « marais stagnant » est une absurdité; mais c'est bien à tort qu'on nous l'a attribuée.

Ce n'est donc pas sans raison que nous invitions, et nous invitons encore M. Langley à exercer sa rare habileté pour nous donner les détails des taches dans leur période de calme, calme cependant *toujours relatif*, car il ne faut pas s'attendre à trouver une stabilité quelconque là où il y a des mélanges de matières de différentes températures et densités qui produisent toujours des courants; cependant elles sont tranquilles en comparaison des paroxysmes que nous venons de signaler.

Pour ne pas allonger cette note outre mesure, je renvoie le lecteur à ce que j'ai dit dans les *Memorie della Società spettroscopica*, année 1875, p. 7 et suiv.

nous paraît tranchée; mais si, au contact des filets lumineux avec les masses obscures, il y avait une transition diffuse de 3 ou 4 kilomètres, elle ne nous serait pas sensible. Dans notre atmosphère même, nous voyons des filets de gaz très-minces se propager en se diffusant très-lentement. Doit-on être surpris que ces masses nous paraissent stables pendant les quelques minutes que dure une observation? On sait du reste combien, lorsqu'on les surveille, elles changent d'un moment à l'autre : cela arrive dans les nuages, et même dans les liquides qui ont une certaine différence de densité (eau et alcool, eau et sirop). Nous savons qu'un mélange parfait ne s'opère jamais qu'au bout d'un certain temps, qu'on peut seulement abréger par une agitation artificielle. Andrews a constaté la structure filamenteuse de l'acide carbonique à la limite de son passage de l'état gazeux à l'état liquide.

2° Étant donnée une masse gazeuse de nature déterminée et de pression à peu près constante, il y a une limite de température à partir de laquelle elle cesse brusquement d'être brillante. Au-dessus de cette température, les veines gazeuses sont parfaitement terminées et nettement séparées de la matière moins lumineuse qui les entoure. C'est ainsi, par exemple, que la flamme d'une bougie est nettement terminée sur son contour, quoiqu'elle soit composée d'un fluide élastique. Ainsi donc, même en supposant que la matière absorbante qui constitue les ombres soit à l'état gazeux, elle pourra être séparée de la photosphère par une ligne bien tranchée; l'explication sera plus facile encore si l'on suppose que la photosphère est composée de la même manière que les nuages et les brouillards.

3° Nous avons dit qu'on pouvait désigner sous le nom de *nuage* la matière qui forme le noyau obscur en arrêtant les

rayons lumineux, mais cette expression nous paraît mal choisie. Un nuage est une masse opaque, composée quelquefois de gouttelettes liquides, quelquefois de petits cristaux ou de poussière solide. Or la matière éruptive qui forme le noyau d'une tache est transparente ; elle est seulement douée d'une absorption élective qui dépend de sa nature chimique et produit dans le spectre des raies noires bien déterminées. Elle est donc gazeuse dans le sens véritable de ce mot ; elle est même lumineuse, car les noyaux ne sont pas absolument obscurs, seulement elle est moins brillante que la substance qui l'environne ; elle peut donc être pénétrée et envahie par des courants de matière photosphérique. Au contraire la matière de la photosphère est opaque, comme nous l'avons prouvé (t. I, p. 92.)

4° Ces courants photosphériques, étant plus chauds et plus légers, pourront recouvrir en partie la matière absorbante, flotter au-dessus d'elle et former un bourrelet sur son contour ; ils pénétreront à l'intérieur avec un mouvement assez lent, à cause de la résistance du milieu. Ainsi s'explique l'aspect que présentent les pénombres composées de courants et de rayons semblables à des langues qui se répandent sur la région sombre et la recouvrent progressivement.

C'est précisément cette série de phénomènes qui a suggéré à W. Herschel sa théorie des taches : il supposait une couche lumineuse percée d'un trou à travers lequel nous voyons une seconde couche obscure placée sous la couche brillante ; la matière lumineuse se précipitait sous forme de courants pour aller remplir l'espace vide. Cette théorie représente les faits matériels, et les choses se passent comme si cette couche existait réellement ; l'erreur d'Herschel consistait à donner aux faits observés une généralité qu'ils ne possédaient pas : il supposait dans toute l'étendue du globe solaire une couche

noire située au-dessous de la couche brillante, tandis qu'elle n'existe que dans l'espace borné où se produisent ces éruptions.

Tant que dure cette masse adventice qui produit le noyau de la tache, les courants de matière lumineuse qui pénètrent dans son intérieur (voir *fig.* 211, 212) peuvent y nager à la surface ou s'y dissoudre en se refroidissant; ils peuvent même prendre un état différent de celui qui constitue la photosphère et cesser d'être visibles. Ce phénomène peut s'expliquer de deux manières : la nappe absorbante peut être plus froide, et alors les courants cesseraient d'être lumineux, parce que leur température s'abaisserait au-dessous de celle qui les rend incandescents ; elle peut, au contraire, être plus chaude par l'action des gaz qui sortent de l'intérieur du corps solaire : alors les courants composés de particules solides s'échaufferont, redeviendront transparents et cesseront d'être lumineux par eux-mêmes. Cette dernière explication correspond à la théorie d'Herschel et de Wilson, qui regardaient la photosphère comme un brouillard incandescent : la première sera admise par ceux qui pensent, avec M. Frankland, que la photosphère est à l'état gazeux proprement dit, et que sa vive lumière est due à l'action combinée d'une haute température et d'une forte pression sous laquelle tous les gaz donnent un spectre continu.

IV. Mais enfin cette théorie, qui regarde les taches comme formées simplement par les produits des éruptions, réduit l'explication de la tache à un effet de *nuage*. Elle amoindrit le grand phénomène solaire et le ravale aux conceptions mesquines de Galilée, Scheiner et Kircher. Est-ce là un progrès de la Science ? N'est-ce pas au contraire la ramener à son berceau ? Nous répondrons que, si ces faits sont exacts et si la vérité se rencontre au berceau, il faut bien y ramener la Science égarée, et que la grandeur des phénomènes de la nature ne doit

pas être mesurée selon nos idées préconçues. Mais nos adversaires confondent en réalité des choses bien différentes. Nous avons plusieurs fois insisté sur ce point, que toute *tache* suppose une éruption, que cette éruption a pour cause certaines actions intérieures du Soleil qui nous sont inconnues ; que ces actions troublent l'équilibre solaire dans une vaste région, et qu'une portion seulement de cette région, qui est occupée par des vapeurs absorbantes, constitue la partie sombre, celle qui est appelée *tache*. Or énumérer ces faits, dont l'ensemble est désigné par le nom de *tache* (nom dérivé seulement de la partie du phénomène qui frappe les yeux du vulgaire), ce n'est pas ramener la Science à son point de départ. Si les Galilée, les Scheiner, les Kircher ont deviné le phénomène dans ses causes et dans toute sa grandeur, ils étaient loin de pouvoir appuyer leur assertion sur des faits ; et, si la Science moderne a comblé cette lacune, si d'une hypothèse elle a fait un phénomène positif, démontré par le spectroscope, est-ce que cela ne constitue pas un progrès, un grand progrès ([1]) ?

V. Mais, dit-on encore, comment se fait-il que la nappe absorbante provenant de l'éruption reste si longtemps sans se dissoudre et sans se mélanger avec la matière photosphérique ? Car l'observation nous apprend que certaines taches persistent pendant un temps très-considérable, trois et même quatre rotations. Nous avons déjà en partie répondu à cette objection ; mais, comme elle est importante, nous n'hésitons pas à rappeler et à compléter notre réponse.

([1]) M. Capello a fait reproduire par la photographie une ancienne gravure trouvée à Lisbonne, où le Soleil est représenté comme un corps enflammé, avec des éruptions, des taches sombres formées par ces éruptions, etc. Cette figure est due au P. Kircher, et on la trouve dans son *Mundus subterraneus*, t. I, p. 64. Il est inutile de s'arrêter à discuter une telle figure, qui n'est évidemment qu'un produit de l'imagination, accidentellement heureuse dans certains cas et absurde dans d'autres.

Ces taches si persistantes ne sont pas, comme on pourrait le croire au premier abord, à l'état de repos et d'équilibre ; la cause qui les a produites agit d'une manière continue, et quelquefois avec un redoublement d'intensité considérable ; de nouvelles quantités de matière, venant constamment de l'intérieur, empêchent la tache de disparaître, la modifient et la transforment lorsque l'éruption devient plus active, tandis qu'elles lui conservent pendant longtemps le même aspect lorsque la matière éruptive s'écoule régulièrement de l'intérieur à l'extérieur. Nous avons déjà parlé de ces redoublements d'activité, lorsque, à propos des mouvements propres des taches, nous avons signalé les sauts en avant qui se produisent d'ordinaire au moment où une tache prête à se fermer prend un nouveau développement (*voir* t. I, p. 141). Si nous pouvions observer les éruptions sur la surface du disque solaire, nous verrions que ces phases et ces mouvements brusques en avant sont toujours accompagnés d'une émission abondante de matière éruptive. Il est impossible de faire directement ces observations; mais le fait n'en est pas moins certain, et nous en avons la preuve dans les changements de forme que les taches éprouvent constamment dans ces circonstances. La couronne de facules qui environne les taches cratériformes montre que, même dans ces taches qui paraissent si tranquilles, il y a un mouvement continuel de l'intérieur à l'extérieur. Lorsqu'on voit disparaître ces facules, lorsque le bourrelet qui entoure la pénombre s'abaisse, c'est que la tache est sur le point de disparaître, et l'on peut avoir la certitude que, au bout d'un jour ou deux, elle sera complétement fermée. Ces explications sont encore confirmées par une remarque déjà ancienne, à savoir que les taches durent plus longtemps lorsqu'elles sont peu nombreuses, aux époques de minima et de calme.

De tout ce que nous venons de dire, nous pouvons évidemment conclure que la région noire qui constitue le noyau d'une tache est un phénomène tout à fait secondaire : le principal c'est l'éruption. C'est, si on le veut, une espèce de nuage, une fumée provenant de l'intérieur du globe solaire, par une ou plusieurs ouvertures, et se réunissant en une seule masse, comme les jets de vapeur d'une solfatare qui, issus de plusieurs points, se réunissent pour former un seul nuage.

Nous avons cherché à répondre aux objections qui nous ont été faites par des savants illustres, mais nous ne nous flattons pas de les avoir persuadés. Chacun a sa manière de voir, et les opinions personnelles sont les plus chères, surtout lorqu'on se les est formées *a priori*, sans y être suffisamment préparé par l'observation. Nous ne prétendons pas que le dernier mot ait été dit par nous, car il reste encore à lever plus d'une difficulté. Ainsi, par exemple, nous ne connaissons pas encore bien la constitution de la photosphère, et deux opinions sont toujours en présence. Nous nous sommes fondé sur le principe de Kirchhoff; mais nous savons que ce principe n'a pas la généralité qu'on lui a attribuée. Il y a par exemple la raie D_3 dont le renversement n'est pas prouvé ; le renversement de quelques autres raies est encore douteux. L'hydrogène flotte au-dessus de la couche renversante, et il a un mode d'action particulier sous certains rapports. Les recherches ne sont donc pas encore terminées, mais nous sommes persuadé que le plus gros est fait, et qu'il n'y a plus qu'à continuer dans la même voie pour arriver à une solution définitive du problème.

Nous finirons ce long Chapitre par deux mots sur l'explication des facules. L'explication la plus simple est celle qui résulte du fait, déjà plusieurs fois constaté, que les facules sont

des élévations de la photosphère (*voir* t. I, p. 112). Par suite de cet exhaussement, la photosphère se soulève au-dessus de la couche absorbante, qui est assez mince, et les crêtes de ses vagues, échappant à l'extinction de la lumière, paraissent plus lumineuses. Cette élévation est souvent mesurable ; mais la couche, fortement absorbante, est si mince qu'une élévation qui échappe à nos mesures, toujours difficiles près du bord, est suffisante pour produire cet effet. Cela explique pourquoi les facules forment souvent autour des taches un bourrelet bien sensible; elles peuvent résulter de la force éruptive qui, agissant au centre pour y accumuler des quantités croissantes de matière, repousse et relève sur les bords la matière photosphérique; elles peuvent provenir aussi de l'agitation qui accompagne nécessairement le mélange de deux masses de température différente. Lorsqu'une portion est ainsi soulevée, on y observe de longues traînées de vapeurs de fer et de magnésium, ainsi que l'a constaté M. Tacchini. Ces soulèvements ne constituent pas une éruption proprement dite, mais c'est une phase des phénomènes dus à l'activité solaire, et, autour des régions qui paraissent ainsi plus lumineuses, on remarque constamment une plus grande vivacité dans l'éclat de la chromosphère.

Mais il y a une autre manière de concevoir la production d'une facule. Une simple éruption d'hydrogène doit creuser en dessous la couche métallique absorbante et mettre à la place une couche hydrogénée : celle-ci étant transparente pour la plus grande partie des rayons (car elle n'absorbe que ses quatre raies) doit laisser voir la photosphère plus brillante qu'auparavant. Il est très-difficile de constater avec exactitude les relations locales qui existent entre les deux phénomènes, lorsqu'on les observe à une époque de grande activité, à cause de la complication que présentent alors les protubérances,

mais il n'en est pas de même aux époques de calme. En observant alors avec beaucoup de soin et de précision, nous avons souvent remarqué de petites éruptions hydrogéniques non métalliques sur le bord oriental; le lendemain, au point correspondant du disque, nous constations la présence d'une facule très-vive qui, le jour suivant, présentait souvent un point noir en son centre. Il est impossible après cela de révoquer en doute la relation qui existe entre ces phénomènes.

Évidemment les facules ne sont dues qu'aux éruptions d'hydrogène, et en sont une conséquence soit directe, soit indirecte.

§ III. — *Discussion de quelques autres théories des taches.*

Nous ne nous arrêterons pas longtemps à cette discussion; car déjà, dans la première Partie, nous avons suffisamment examiné plusieurs de ces théories. Il faut donc d'abord écarter toutes celles qui expliquent les taches par des scories solides nageant sur une surface liquide, à moins qu'on n'admette, comme l'a proposé quelqu'un, des scories gazeuses, car alors ce ne serait qu'une question de mots. Mais nous ne pouvons nous dispenser de dire quelques mots de la théorie tourbillonnaire. Nous avons déjà formulé nos doutes à cet égard, et exposé les raisons qui nous portent à penser que les mouvements cycloniques, s'ils existent, sont très-rares et purement accidentels. Contentons-nous d'ajouter ici quelques remarques bien simples, mais qui ne sont pas sans importance.

Dans le système tourbillonnaire, il faut admettre : 1° l'existence de trombes ou d'ouragans tournants dans la photosphère solaire; 2° en assigner la cause; 3° expliquer les phénomènes des éruptions; 4° expliquer les phénomènes spectraux.

1° Que, dans la masse solaire, puissent exister des tourbillons, nous n'en doutons point : nous en avons dessiné et publié plusieurs (*voir* t. I, p. 88, etc.); mais ces faits ne suffisent pas à établir une loi générale, qui seule est ici en question. Il faut prouver que ces mouvements existent dans *toutes* les taches, et que celles-ci suivent les lois mécaniques des cyclones. Or le nombre des taches tournantes est très-borné : on en compte *au plus* 5 ou 6 pour 100; et, pour qu'il fût possible d'appuyer la théorie sur ces cas isolés, il faudrait que ces taches satisfissent aux lois des cyclones, au lieu de n'offrir que des rotations accidentelles dues aux forces combinées excentriques des éruptions. Or cela est précisément le cas ordinaire.

D'abord, si nous examinons attentivement une tache circulaire dans la période où elle va disparaître, nous trouverons qu'elle se comporte alors tout autrement que nos cyclones; car nous savons que les cyclones s'élargissent progressivement, de manière à répartir la force vive dont ils sont animés sur une plus grande quantité de matière, ce qui diminue leur vitesse et finit par la rendre nulle; les taches font tout le contraire : elles se rétrécissent et finissent par disparaître en se fermant complétement. Quant aux lois de rotation, nous dirons qu'ayant soigneusement suivi plusieurs de ces prétendus cyclones, nous avons trouvé qu'après avoir présenté toutes les apparences d'une rotation déterminée, ils s'arrêtent pour commencer parfois ensuite à tourner en sens contraire, ce qui est absolument inexplicable dans un mouvement de rotation systématique. Donc, dans la plupart des cas, nous pouvons affirmer, d'après nos observations personnelles, que la force tourbillonnaire est un simple effet du hasard et non une réalité constante ayant une loi définie. De plus on devrait voir ces cyclones monter vers les pôles dans des arcs paraboliques,

comme dans notre planète, ou suivre une autre ligne théorique ; mais jusqu'à présent on ne les a vu décrire que des arcs elliptiques très-courts et très-irréguliers. Il faudrait encore attribuer aux cyclones solaires une durée extrêmement grande et une stabilité prodigieuse, car ils persisteraient pendant plusieurs rotations.

Nous parlons ici de l'hypothèse tourbillonnaire telle qu'elle est présentée par ses auteurs : car, si l'on admet que ces tourbillons ne se forment pas seulement dans la couche brillante, mais qu'ils se font sentir jusque dans l'atmosphère gazeuse qui surmonte la chromosphère, nous sommes complétement d'accord. Parmi les faits qui tendent à prouver l'existence des tourbillons solaires, le plus important à nos yeux, c'est la forme que présente d'ailleurs quelquefois la matière éruptive et la double courbure des protubérances (*Pl* G, *fig.* 4) ; mais ce fait ne prouve rien en faveur de la théorie tourbillonnaire, car la masse tournante est bornée à la chromosphère, et, tandis que dans notre observation la matière monterait, dans l'autre théorie elle doit s'engouffrer.

Sans doute, ces courbures sont des hélices vues par projection ; mais remarquons que ces hélices n'ont pas toujours leur axe disposé verticalement : il y en a qui sont fortement inclinées, quelques-unes même se trouvent dans la position horizontale (*voir* p. 63, *fig.* 171). Comment expliquer tout cela par une simple comparaison des tourbillons solaires avec nos cyclones ? Il est bien naturel au contraire que, dans une éruption de matière gazeuse, il se produise des collisions, des changements de direction et finalement des mouvements tournants dans des directions quelconques, et souvent même bien définies ; mais il y a loin de ces rotations accidentelles et peu durables aux mouvements systématiques dont on veut faire le fondement de toute la physique solaire. Enfin la rotation

des cyclones devrait être indéfinie et durer autant que la tache elle-même : or ces rotations ne continuent presque jamais plus de deux jours; au troisième, elles cessent par le frottement qu'elles rencontrent, ou rebroussent chemin par l'effet d'une impulsion contraire.

2° Il faut assigner les causes de cette prétendue rotation systématique. Une des composantes est vite trouvée : c'est la rotation solaire, qui détermine nécessairement un mouvement rotatoire dans les masses qui se transportent d'une région à l'autre par une action convergente; mais il est évident que cette cause seule ne suffit pas, car elle subsiste toujours, et nous n'avons pas toujours des taches. Pourtant on n'en a pas indiqué d'autres. Nous n'en ferons pas un reproche à la théorie, car, en réalité, nous ne connaissons pas davantage la vraie source des éruptions; mais enfin celles-ci pourraient bien contribuer à faire naître les tourbillons, et alors pourquoi les rejeter?

3° Quant à l'explication des phénomenes eruptifs, les partisans des tourbillons s'en débarrassent assez facilement : ils nient carrément l'existence d'éruptions véritables, ils déplorent même l'introduction de ce mot. Mais, comme repousser tout cela d'une manière absolue serait aller trop loin, ce serait enfin nier l'évidence, voici le moyen terme qu'ils ont imaginé. Selon eux, le tourbillon est la seule chose possible, et de plus il doit exercer une absorption à son centre. Dans ce centre donc s'*engouffrerait* l'hydrogène de la chromosphère, comme les corps légers s'engouffrent dans les tourbillons d'une rivière; mais ce gaz, à cause de sa légèreté, ne pouvant pas rester au fond, il serait rejeté à distance de l'axe du tourbillon, où il remonterait, simulant ainsi une éruption. Si cette théorie n'est pas vraie, il faut bien dire qu'elle est ingénieuse; mais comment prouver tout cela ?

Voici la réponse : un observateur célèbre a, dit-on, trouvé que sur le noyau des taches, lorsqu'elles sont au bord du Soleil, la chromosphère manque absolument ; elle est donc absorbée par l'axe du tourbillon. Voilà la preuve demandée. Des éruptions métalliques, on ne s'en occupe point ; car, dit-on, ce ne sont que de faibles nappes soulevées de cette enveloppe qui renverse les raies spectrales : ce sont des masses réellement insignifiantes.

Il y a une petite difficulté dans tout cela ; c'est que l'observation sur laquelle on s'appuie est *fausse*. En effet, dans notre longue expérience, nous n'avons *jamais* trouvé la chromosphère manquant sur les taches ; au contraire, elle y est toujours plus élevée : si elle peut paraître plus basse (ce qui est très-rare), c'est que l'hydrogène est remplacé par des vapeurs métalliques. Une seule fois nous avons vu la chromosphère manquer au bord sur un arc d'environ un degré de longueur, loin de toute tache, et elle paraissait cachée par un corps opaque. Mais la prétendue observation n'est pas seulement fausse, elle est impossible, car les flammes d'hydrogène qui couronnent le gouffre doivent être traversées au bord par le rayon visuel de l'observateur, et par là même elles doivent simuler la présence de la couche chromosphérique. De plus au centre des taches on ne voit jamais l'hydrogène s'engouffrer, mais bien plutôt sortir. Il ne reste donc rien des prétendues preuves de cette théorie tirées des observations.

Si nos critiques avaient seulement vu quelquefois les choses avec leurs yeux, ils n'auraient jamais été induits en erreur par une assertion inexacte ou ambiguë d'un observateur de mérite, mais qui n'avait peut-être pas d'instruments appropriés à ce genre particulier d'observations.

4° Quant à l'explication des phénomènes spectraux, la théorie tourbillonnaire n'en tient pas compte ; ainsi que nous

venons de le dire, elle ne les considère que comme des accessoires insignifiants. L'obscurité des taches est expliquée par la diminution de la température à l'intérieur du tourbillon, et les découvertes spectrales sont comme non avenues. En effet, on ne donne pas la raison pourquoi les raies noires renforcées appartiennent aux *mêmes substances qu'on voit briller au bord dans les protubérances,* on ne se charge pas davantage d'expliquer les raies brillantes qu'on voit sur les noyaux des taches dans les grands changements qu'elles subissent, et qu'on ne peut expliquer que par des éruptions. Il ne serait pas difficile de faire rentrer dans la vraie théorie plusieurs des phénomènes qu'on invoque à l'appui de la théorie tourbillonnaire, mais nous devons la prendre telle qu'elle est présentée par ses défenseurs. Il nous sera surtout bien difficile de l'admettre tant que nous verrons les gaz être *lancés en haut*, à la place même où leur théorie demande qu'ils soient *engouffrés*. On a cité à l'appui de ce fait l'observation de Lockyer qui assure avoir vu la chute de la matière dans l'intérieur des taches, qu'il appelle *down rush*. Cette chute est bien possible, puisque dans la tache il y a une température plus basse et un afflux de la photosphère tout autour produit par l'appel de la colonne sortante ; mais cela n'empèche pas que, de temps en temps, il n'y ait des jets vigoureux qui soulèvent la matière et produisent les phénomènes que nous appelons *éruption ;* de sorte que, pour quelques cas de *down rush*, nous en avons de bien plus nombreux en sens contraire. La statistique de nos observations nous a prouvé que, pour 100 taches bien observées, soit à leur entrée, soit à leur sortie, nous en avons 85 accompagnées d'éruptions.

Nous ne nous flattons pas que la théorie exposée dans le paragraphe précédent soit absolument complète ; mais, si elle n'explique pas tous les détails, cela tient peut-être à ce que ces

détails sont encore mal connus. Dans tous les cas, elle a sur les autres l'immense avantage de relier ensemble le plus grand nombre des phénomènes observés. De plus, elle concilie entre elles plusieurs opinions qui paraissaient complétement opposées : ainsi, elle admet les éruptions et les cratères comme le voulaient Cassini et Chacornac, les trous et les cavités comme Wilson et Herschel, les nuages comme Galilée et Kirchhoff. Une théorie ne saurait être vraie si l'on n'y retrouve pas l'explication des idées émises par les grands savants qui ont étudié attentivement le Soleil, car ces hommes éminents ne se sont pas laissé guider par le caprice : ils ont cherché à exprimer à l'aide de leurs hypothèses les phénomènes qu'ils avaient observés. Leurs observations étaient seulement incomplètes, mais elles n'étaient pas fausses; les nouveaux moyens de recherches que nous avons à notre disposition nous permettent de voir des détails qui leur ont échappé et de rectifier leurs vues dans ce qu'elles avaient de hasardé; ces théories ont cependant un fond vrai, et la véritable explication doit donner la raison de tous les phénomènes observés par eux.

§ IV. — *Des variations du diamètre solaire.*

Tout ce qui vient d'être dit nous prouve que le corps solaire n'est pas solide et invariable à sa surface, mais qu'il est enveloppé d'une couche gazeuse incandescente dont l'épaisseur nous est inconnue. Peut-être que toute la masse est dans cet état; mais, laissant de côté cette question, il est certain que la couche gazeuse n'est point aussi mince qu'on l'a cru autrefois. L'étude des protubérances et des taches nous a montré que la surface entière de l'astre est parcourue comme par des vagues gigantesques qui, partant des régions équato-

riales, vont se concentrer aux pôles en y transportant les éruptions hydrogénées, et en entraînant les taches aux latitudes supérieures. Si la période de ces changements est bien constatée pour les taches, il n'en est pas de même pour les protubérances, à cause du petit nombre d'années d'observations que nous possédons ; mais, outre ces grandes oscillations, il y en a plusieurs autres à intervalles très-courts. En présence de ces faits, serait-il absurde de se demander si les dimensions de cet astre sont absolument invariables avec le temps, si sa forme est rigoureusement sphérique, et si son axe de rotation coïncide avec l'axe de figure et le centre de gravité? Nous ne le croyons pas.

D'un autre côté, il y a assez longtemps que des astronomes distingués ont trouvé entre les valeurs du diamètre solaire résultant de leurs observations méridiennes des différences considérables, dépassant de beaucoup les erreurs admissibles dans des observations soignées, et cette question a été discutée à fond au commencement de ce siècle, surtout pour Lindenau et Carlini.

Encore à présent, malgré la perfection des instruments modernes et l'introduction des chronographes, il n'est pas rare de rencontrer des différences de 3 ou 5 et même de 7 secondes en arc, et jusqu'à une demi-seconde en temps, dans les observations complètes des différents jours. Ces différences sont trop fréquentes, et présentent quelquefois une marche trop régulière, pour pouvoir être interprétées comme erreurs accidentelles des observations.

Ce qui frappe encore davantage, c'est de voir que, malgré la variété des méthodes et la perfection des instruments, la mesure du diamètre solaire a fait bien peu de progrès. Nous réunissons ici quelques-unes des valeurs adoptées à différentes époques dans les travaux astronomiques les plus importants.

Époques.	Auteurs.	Diam. horiz.	Diam. vert.
		′ ″	
1661	Mouton	32. 3,12	»
1666	Picard	32. 8, 8	»
1673	Flamsteed	32.11,08	»
1684	Cassini	32. 7,08	»
1719	Halley	32. 10,09	»
1724	De Louville	32. 4,16	4″,0
1758	La Caille	32. 6,16	»
1760	De Lalande	32. 2,10	4.1
1764	Id.	32. 2,76	»
1761	Short	31.59,66	»
1769	Encke (¹)	31.56,84	»
1750 à 1758	Le Verrier (²)	32. 3,68	»
»	Id. (³)	32. 0,02	»
1765 à 1766	Lindenau (⁴)	32. 3,10	5″,82
1787 à 1798	Id.	31.59,54	»
1792 à 1793	Maskelyne (⁵)	31.59,40	»
	Piazzi	32. 2,38	»
1820 à 1828	Bessel	32. 1,80	»
1836 à 1847	Airy	32. 3,64	3″,58
1853 à 1860	Id.	32. 2,65	2″,63
1840 à 1860	Obs. de Madras	32. 3,67	»
1835 à 1848	Goujon, à Paris.	32. 4,02	»

Voilà donc une série de déterminations à côté desquelles figurent les noms les plus illustres que possède la Science, et cependant, bien que chaque valeur ait été déduite de centaines d'observations complètes et de milliers de contacts et de passages individuels, les unités même ne s'accordent pas. Jusque dans ces dernières années, on a parlé et l'on parle en-

---

(¹) Par les passages de Vénus.
(²) Par les observations de Bradley, etc.
(³) Passage de Mercure.
(⁴) Observations de Maskelyne.
(⁵) Observations simultanées.

core de corrections à appliquer au diamètre adopté par le *Nautical Almanac* ([1]).

Ces variations frappent d'autant plus que pour la Lune les mêmes observateurs, munis des mêmes instruments, ont trouvé une constance presque absolue du diamètre moyen.

De 1750 à 1752.................	934",95
1753, Bradley...................	934,37
Pour le temps de Bliss.............	934,49
1re époque de Maskelyne............	934,36
2e époque de Maskelyne............	933,80
1812 à 1829....................	934,33

On se demande d'où vient tant d'incertitude pour le Soleil, tandis que pour notre satellite, où ces mesures sont rares et plus difficiles sous certains rapports, l'accord est si complet.

Nous n'ignorons pas que pour le Soleil il y a des circonstances qui augmentent la difficulté de l'observation et qui n'existent pas pour la Lune. La chaleur du Soleil dérange la lunette, elle peut dilater irrégulièrement les plaques des réticules; elle peut faire incliner l'axe de rotation de l'instrument, etc. L'agitation de l'air, qui est plus forte à midi, et l'aspect diffus du bord solaire sont autant de causes d'erreurs qui n'existent pas pour la Lune. Quoi qu'il en soit, les discordances des valeurs du diamètre solaire n'en sont pas moins énormes.

Frappé de la grandeur de ces discordances même pour un seul observateur, Carlini classa les erreurs possibles dans ce genre d'observations et en examina l'influence. Il réduisit les

---

([1]) En 1847, on augmenta le diamètre solaire de 1",84; en 1870, on l'a diminué de 0",60.

erreurs aux catégories suivantes et fit un nombre considérable d'observations pour vérifier l'influence de chacune de ces erreurs.

1° La densité plus ou moins grande du verre de couleur employé. Avec les verres très-faibles, il trouva $2^m 22^s,63$, avec les verres plus forts $2^m 22^s,59$: différence 0″,60.

2° L'ouverture et l'aberration de sphéricité des objectifs. Avec un objectif de 4 pouces et l'ouverture pleine, on trouva $3^m 22^s,68$; avec la moitié $3^m 22^s,68$: différence 0,00. Un autre objectif plus grand donna le même résultat, qui a été confirmé du temps d'Arago, à Paris, par Goujon et d'autres. L'irradiation donc n'a pas d'influence.

3° Le changement de foyer en été et en hiver, qui résulte du changement de longueur du tube : on sait qu'il y a compensation entre cet élément et la longueur focale du verre ; aussi Carlini ne trouva-t-il pas une différence de $\frac{1}{10}$ de seconde en arc.

4° Le grossissement. En le faisant varier depuis 70 jusqu'à 120 fois, on obtint $2^m 22^s,77$ et $2^m 22^s,76$: différence 0″,15.

5° La qualité de la vue de l'observateur. Carlini observa tour à tour avec l'œil droit et l'œil gauche, dont la force était très-inégale chez lui, et il trouva avec l'œil droit $2^m 22^s,65$ et avec l'œil gauche $2^m 22^s,58$: différence 1″,05.

De ses nombreuses expériences, Carlini conclut que ces causes diverses ne sauraient expliquer les divergences constatées et que celles-ci peuvent toujours être attribuées à une cause inconnue. On a invoqué l'*état du ciel;* mais les observations du P. Rosa, faites en des jours où l'atmosphère était très-belle à Rome, montrent que les écarts ne manquent pas quand l'état du ciel est aussi favorable que possible. Reste une source d'erreur très-importante, l'*équation personnelle des observateurs*. Celle-ci a une influence considérable. Ainsi entre

Maskelyne et Piazzi on trouve (tableau de la p. 211) une différence de 2″,98, dont la valeur du diamètre obtenu par l'astronome italien surpasse celle de l'astronome anglais, déduite d'observations de même époque. De même encore, entre Maskelyne et De Césaris, on trouve la différence C — M = + 3″,70. Mais, s'il faut tenir compte de cette cause d'erreur lorsqu'il s'agit d'observateurs différents, elle reste constante pour le même observateur, comme l'a démontré le P. Rosa dans son ouvrage. On ne saurait donc comprendre comment cette équation peut varier non-seulement au bout d'un temps très-long, mais périodiquement avec les saisons. De plus, on trouve que l'équation personnelle, qui, prise en bloc, est très-considérable, devient moindre en choisissant des observations simultanées. Ainsi elle est en général de + 2″,10 entre Pond et Bessel, mais pour les mêmes jours elle se réduit à + 0″,87. Et, tandis qu'entre les observateurs d'Oxford et d'Édimbourg elle monte en général à 1″,89, elle se réduit pour les observations simultanées à 0″,01.

Donc, tout en attribuant à cette source d'erreur une part considérable dans les écarts constatés, il en reste encore une partie notable à expliquer. C'est pour cette raison que nous engageâmes notre collègue le P. Rosa à s'occuper de ce problème, et à faire une série d'observations méridiennes chronographiques pour chercher la source de ces différences. Nous priâmes aussi les observateurs de Palerme de nous prêter leur concours, et le P. Rosa discuta en vue du même objet les observations de M. Becker faites à l'Observatoire de Neuchâtel en Suisse. Le résultat de ces recherches fut que les différences, variables d'un jour à l'autre, présentaient pourtant une marche assez semblable dans ces trois stations pour les mêmes jours.

Ce résultat fut mal accueilli, et plusieurs savants s'effor-

cèrent de le représenter comme un effet pur et simple d'erreurs d'observations. Cela était facile à dire, même trop facile! Pour approfondir la question (quoique avec peu d'espoir de convaincre les astronomes) le P. Rosa entreprit de discuter les observations des astronomes les plus distingués, vaste travail que la mort l'empêcha d'achever. Dans la partie historique qu'il nous a laissée ([1]), on trouve cependant des conclusions assez importantes, que nous rapporterons ici pour édifier les astronomes, sans prétendre que la question soit par cela seul tranchée, ni partager toutes les opinions théoriques de l'auteur.

1° En discutant les observations de Greenwich depuis 1750 jusqu'à 1870, corrigeant celles de Bliss et les comparant aux autres, il se trouve que le diamètre horizontal peut être représenté dans les différentes années par la courbe H de la *fig.* 213, et le diamètre vertical par la courbe V ([2]). L'excès du diamètre vertical sur le diamètre horizontal est constaté par Bouguer, De Cesaris et Carlini. Mossotti calcula l'excentricité e du sphéroïde allongé pour cette époque fameuse par les observations, non-seulement de Maskelyne, mais encore de De Cesaris, et la trouva assez sensible : les valeurs de $\frac{e^2}{2}$ furent $-\frac{1}{355}$, $-\frac{1}{328}$, $-\frac{1}{362}$; mais avec le temps cette curieuse figure s'effaça, et les diamètres devinrent égaux.

Il n'est pas facile de se prononcer sur la cause de ces inégalités. Il est vrai que la manière différente dont s'observent les deux diamètres, à savoir le diamètre horizontal par les

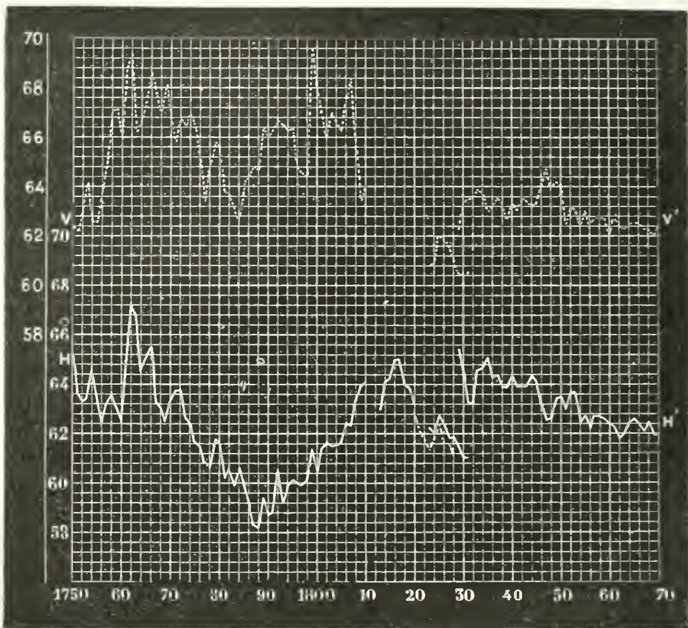
---

([1]) *Studi intorno ai diametri solari*. Roma; 1873.

([2]) Les interruptions de la courbe ou les sauts représentent les différentes séries des observations employées, qui sont discontinues.

passages, et le vertical par les pointés, pouvait produire une différence dans le résultat des mesures; mais alors pourquoi cette différence n'a-t-elle pas persisté? Pourquoi s'est-elle présentée à Bouguer, qui employait l'héliomètre? Il faut regretter qu'on n'ait pas étendu, autant que la question le méritait, l'usage de cet instrument à la mesure du diamètre

Fig. 213. — *Courbe représentant les diamètres solaires de 1750 à 1870.*



solaire, et que même à présent bien peu d'astronomes s'occupent de ce problème.

Mais on a eu tort de chercher l'origine des inégalités en question simplement dans la manière différente dont les observations avaient été faites, car le même résultat a été déduit aussi d'une seule et même espèce de mesures, soit des passages seuls, soit des déclinaisons seules. Cela n'a rien qui doive nous surprendre. En effet, comme l'équateur solaire est in-

cliné sur l'équateur céleste d'environ 26 degrés, il en résulte que, dans le passage du diamètre solaire au méridien, on mesure dans le cours de l'année des diamètres inclinés entre eux de 52 degrés. Or Mossotti, en cherchant à représenter les observations de De Cesaris par un sphéroïde, tomba sur le sphéroïde allongé dont nous avons parlé.

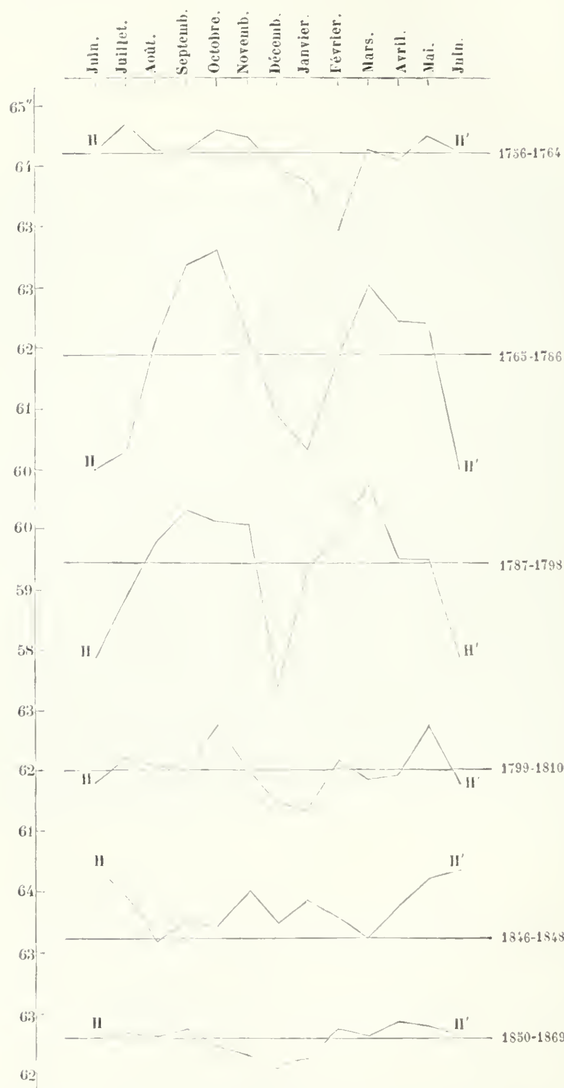
Enfin, s'il y a là un effet dû au mode d'observation, pourquoi ces différences ne restent-elles pas constantes? Pour connaître la marche du phénomène, le P. Rosa détermina la fluctuation que le diamètre solaire présentait aux différentes époques des observations discutées, et nous reproduisons le résultat de ce travail dans la *fig.* 214. La marche générale du phénomène est ici trop accentuée pour être une illusion, et ce serait donner de ces variations une explication tout à fait arbitraire que de les attribuer simplement à des erreurs d'observation.

L'idée d'une variation mensuelle du diamètre semble au premier abord assez singulière; mais, en réfléchissant à ce que nous venons de dire des différentes inclinaisons des diamètres solaires observés dans les mois différents, elle est parfaitement justifiée. De plus, en examinant la *fig.* 9 (page 20 du t. I[er]), nous voyons que les maxima des courbes deuxième et troisième tombent dans les mois d'octobre et d'avril, et les minima en janvier et juin, ce qui s'accorde avec la position de l'équateur solaire dans ces saisons, de manière que les maxima correspondraient aux régions des taches. Mais ici encore les courbes changent dans le siècle suivant.

La variabilité de ces phases avec le temps et leur absence actuelle ne constituent pas une difficulté, car c'est précisément le fait de cette variation qu'il s'agit d'établir ici. Et, si la loi devient différente avec le temps, on pourrait expliquer cette circonstance par le défaut d'une parfaite ellipticité, ou

par la non-coïncidence de l'axe de rotation avec l'axe de figure.

Fig. 214. — *Variations mensuelles du diamètre solaire aux époques indiquées.*



Cependant il est facile de voir que, même à présent, ces

inégalités mensuelles n'ont pas complétement disparu, bien que le changement continuel des observateurs à Greenwich doive éliminer l'effet des équations personnelles.

Quant au rapport que ces variations du diamètre pourraient avoir avec les périodes des taches, la période décennale ne paraît pas se retrouver dans les diamètres, mais la longue période de 50 à 60 ans s'y retrouve assez bien, quoique légèrement déplacée quant à l'époque. Il est remarquable que les phases des diamètres sembleraient avoir une correspondance avec les inégalités du périgée solaire découvertes par M. Le Verrier. Serait-ce là un effet de l'excentricité du centre de gravité du Soleil par rapport au centre de figure? En cette matière, on ne peut que poser des questions, dont la solution est réservée à la postérité. Quant aux causes de ces variations, pour nous elles sont absolument inconnues.

Parmi les variations du diamètre solaire, une des plus importantes est la différence qu'on a remarquée entre la valeur conclue des passages au méridien et celle qui résulte des éclipses. Dès 1860, en observant l'éclipse totale en Espagne, nous fûmes surpris de la vivacité de la *sierra rosée,* ou de ce qu'on appelle maintenant la *chromosphère.* Il nous parut impossible qu'une couche aussi vive ne dût pas influencer les dimensions de l'astre prises avec les lunettes, quoiqu'elle fût toute en dehors du corps solaire. La couleur du verre obscurcissant ne devait pas être indifférente, et, en effet, avec un verre rouge, nous trouvâmes un diamètre plus grand de 1″, 5 qu'avec un verre bleu.

Lorsque nous réussîmes à voir l'image spectrale du Soleil à l'aide de la combinaison spectroscopique qui a été décrite précédemment (page 28), nous essayâmes avec elle de mesurer le diamètre solaire, et nous trouvâmes une différence de 3 à 6 secondes en moins. On a contesté ce résultat, parce

que des observations faites par M. Respighi ne l'avaient pas confirmé. La différence ne nous paraît cependant pas inexplicable.

M. Respighi a fait ses observations avec une lunette plus petite qui donnait moins de lumière et une image plus petite que la moitié de la nôtre, et, pour la bien voir, il a dû donner à la fente une plus grande ouverture que nous. Or le diamètre qu'on trouve de cette manière est la somme des diamètres de l'image et de la fente, et, comme la fente est, proportionnellement à l'image du réfracteur, plus grande avec une lunette plus petite, la correction est aussi plus grande, et ne peut être négligée pour l'instrument de M. Respighi, tandis que, pour le nôtre, elle est très-petite. En élargissant un peu la fente, nous nous sommes convaincu qu'une correction de cette nature était absolument nécessaire.

Mais la question était trop importante pour la laisser pendante, d'autant plus que les observations des éclipses solaires, et le passage de Vénus, observé spectroscopiquement par M. Tacchini, donnaient pour résultat un diamètre moindre. Il fut donc résolu de nous réunir à Palerme pour faire des observations comparatives par les différents moyens. Nous fûmes assez heureux pour obtenir la coopération de deux astronomes distingués, MM. Rayet de Paris, et Dorna de Turin [1]. Les observations furent commencées par ma méthode héliospectroscopique, mais la chaleur solaire, très-sensible dans l'atmosphère pure de Palerme, ayant ramolli les mastics des prismes, nous força de les interrompre bientôt. Elles furent continuées par un procédé plus simple imaginé par M. Tacchini, qui consiste à noter l'entrée et la sortie du bord solaire aux raies longitudinales produites dans le spectre

---

[1] *Voir* les *Memorie della Società spettroscopica italiana*, vol. IV, p. 113.

par les grains de poussière qui sont accidentellement tombés sur la fente. Dans l'emploi de cette méthode, il est indispensable d'amener la fente exactement sur le diamètre central, et de la ramener continuellement à cette position, malgré le mouvement du Soleil en déclinaison : ce que nous eûmes soin de faire toujours rigoureusement.

Les résultats obtenus sont les suivants :

1° Le demi-diamètre spectroscopique est plus petit de $0^s,124$ que celui du méridien, observé le même jour, ce qui donne pour le diamètre une différence de $3'',72$. Le passage de Vénus donne $8'',66$ (Tacchini). Aucune des observations, comparées aux observations méridiennes, ne s'écarte en sens contraire, malgré la petitesse de cette différence.

2° Au contraire, si l'on compare ce résultat au *Nautical Almanac*, les observations s'écartent tantôt dans le sens positif, tantôt dans le sens négatif. Comme le *Nautical Almanac* admet un diamètre constant, cela prouverait que, dans cet intervalle, le disque solaire a subi de petites variations. La variété des observateurs nous met à l'abri des équations personnelles.

3° Le chronographe est nécessaire pour ces observations, et la concordance est plus grande pour les mesures spectroscopiques que pour les observations méridiennes ordinaires, de sorte que M. Tacchini propose d'instituer un système d'observations spectroscopiques.

4° L'état de l'atmosphère troublée par la brume et le vent du sud (sirocco) a une grande influence sur les résultats, ce qui se comprend facilement; mais encore ici les divergences sont plus sensibles dans le passage méridien que dans le passage spectroscopique.

Tous les faits exposés dans ce Chapitre sont encore loin, selon nous, de vider la question; cependant ils prouvent que nos doutes n'étaient pas émis à la légère. Les savants

verront qu'une question étudiée avec soin par les Lindenau, les Mossotti, les Césaris, les Bessel, les Le Verrier, etc., n'est pas si facile à trancher *a priori*, ni par des moyennes quelconques. Ces moyennes ne prouvent rien : on pourrait démontrer par les moyennes que nous n'avons ni été, ni hiver, car les fluctuations de la température d'une année à l'autre sont minimes. Il en est de même ici : c'est une question de détails, il faudra comparer les observations individuelles et en étudier la marche. Ainsi, par exemple, le beau travail de M. Newcomb, par lequel il a trouvé que les observations de Greenwich et de Washington, faites le même jour, ne diffèrent que d'une fraction de seconde, ne prouve que ce que nous avons déjà dit, à savoir que les différences disparaissent dans les observations simultanées, ce qui est, par contre, une preuve que les différences résiduelles dans les observations non simultanées sont réelles.

Nous ne prétendons qu'avoir posé les questions; il ne faut pas s'attendre à les voir résolues de sitôt, par ce temps de préoccupations contraires. Si les anciens astronomes ont été embarrassés par cette question, c'est qu'ils ne connaissaient pas assez la nature du Soleil pour y soupçonner une variabilité; mais, la science moderne ayant établi que sa constitution n'est pas incompatible avec des variations quelconques, un obstacle au moins est désormais levé pour la solution définitive du problème. Cette question intéresse non-seulement la Physique solaire, mais encore l'Astronomie de précision; car un écart entre le centre de gravité et le centre de figure du Soleil pourrait faire naître des irrégularités considérables dans la position de l'écliptique et dans les éléments de l'orbite solaire.

§ V. — *Conclusions générales.*

Nous venons d'exposer en détail un grand nombre de faits et de considérations que nous pouvons résumer de la manière suivante :

1° Les taches, les facules, les éruptions et les protubérances sont des phénomènes qui dépendent de l'activité intérieure du Soleil : ils sont donc plus ou moins intimement liés ensemble et sont la représentation de vastes perturbations intérieures qui se manifestent par des éruptions et des agitations de la photosphère. La région sombre qui constitue le noyau d'une tache, malgré sa structure si frappante, n'est qu'un phénomène secondaire de la crise générale : elle est produite par l'absorption due aux vapeurs éruptives interposées entre la photosphère et l'observateur.

2° L'activité du Soleil ne se manifeste pas également sur toute la surface de cet astre : il y a deux maxima constants de part et d'autre de l'équateur entre 10 et 30 degrés de latitude. Cette région est celle des taches et des éruptions métalliques proprement dites. Les régions des taches et des protubérances ont des mouvements de transport vers les pôles à longues périodes. Il paraît que toute la masse solaire est engagée dans cette circulation gigantesque, de sorte que la moitié de son volume, comprise entre + 30° et — 30° de latitude, formerait un énorme courant ascendant, et l'autre moitié, qui comprend les pôles, le contre-courant descendant. Cependant les détails de cette circulation sont assez compliqués.

3° Au delà de cette zone principale, on en trouve une seconde où les taches et les éruptions se produisent d'une manière intermittente ; ses limites varient avec l'activité solaire :

elle s'étend quelquefois jusqu'aux pôles et présente alors un maximum à 60 ou 70 degrés de latitude. C'est à cette même région que l'atmosphère solaire éprouve une variation brusque dans sa hauteur, ainsi que nous le savons par l'observation des éclipses totales. Quelquefois cette zone descend plus bas, et le maximum semble s'arrêter vers 45 degrés de latitude. Ces variations n'ont pas encore été étudiées d'une manière assez suivie pour qu'on puisse en reconnaître les lois. Seulement il est constant que dans cette zone ne se trouvent jamais ces éruptions métalliques si remarquables qui sont fréquentes dans les régions équatoriales.

Les éruptions métalliques ne peuvent pas s'expliquer par les simples mouvements de la couche qui renverse les raies du spectre; car elle est très-mince, quoiqu'elle soit plus épaisse à l'équateur qu'au pôle. Si l'on admet les tourbillons dans la photosphère solaire, ce n'est pas une raison suffisante pour nier les éruptions. Des tourbillons excités dans les régions supérieures de l'atmosphère solaire pourraient même imiter les éruptions par leur force aspirante, mais en général elles sont produites par une force impulsive agissant de bas en haut.

L'éclat particulier des facules peut être dû à une double cause : une élévation locale du niveau de la phôtosphère, qui dépasse la couche absorbante, mais on peut aussi l'expliquer par le refoulement de cette couche que produiraient les jets hydrogénés au point de leur sortie, où ils sont plus condensés.

Le Soleil est loin de posséder la même activité sur tous les méridiens. Les régions les plus actives conservent assez longtemps la même longitude. Les facules et les éruptions sont inégalement distribuées sur le contour du globe ; si nous pouvions apprécier facilement ces différences, le disque solaire nous offrirait un aspect comparable à celui de la Lune ;

nous verrions des parties plus brillantes qui, en arrivant sur le contour, donnent naissance à de nombreuses éruptions, et des parties plus pâles et en même temps plus pauvres en protubérances.

Rien ne prouve la parfaite invariabilité du diamètre solaire; au contraire, l'observation est favorable à des variations séculaires de ses dimensions, et à des variations à courte période. Les régions des facules et des taches paraissent être principalement sujettes à ces variations. La figure rigoureusement sphérique du Soleil n'est pas bien certaine; des irrégularités paraissent assez bien constatées aux époques et dans les régions des maxima d'agitation photosphérique.

Telles sont les principales conclusions que nous pouvons tirer d'une série d'observations unique et trop limitée. Nous ne les regardons pas comme générales et définitives; nous les présentons comme un essai de ce que l'on peut espérer si l'on étudie d'une manière soutenue cette nouvelle branche, que nous appellerions volontiers la *Météorologie solaire*.



LIVRE VI.

TEMPÉRATURE DU SOLEIL.

CHAPITRE PREMIER.

ÉVALUATION DE LA TEMPÉRATURE DU SOLEIL.

§ I. — *Introduction.*

Nous abordons en ce moment une question difficile et sur laquelle on a, dans ces derniers temps, émis les opinions les plus contradictoires. Les difficultés qu'elle présente sont si nombreuses et si grandes qu'on a été jusqu'à dire qu'il est impossible d'arriver à une appréciation raisonnable. Cependant ces discussions sont à elles seules un véritable progrès, et nous sommes heureux de voir que les affirmations contenues dans la première édition de notre Ouvrage ont poussé les savants à faire des recherches qui, sans résoudre encore la question, l'éclairent cependant et la font avancer d'une manière sérieuse.

Il semble au premier abord que ce soit chose facile de déterminer la température du Soleil; mais, pour peu qu'on y réfléchisse, on reconnaîtra que cette entreprise présente de très-grandes difficultés. Il ne suffit pas, en effet, d'exposer un thermomètre au Soleil, de lire le nombre de degrés qu'il indique et d'augmenter ce nombre proportionnellement au

carré de la distance ; car : 1° ce nombre est relatif à notre zéro conventionnel correspondant à la température de la glace fondante ; il n'a aucun rapport avec le zéro absolu, que les physiciens ont fixé à — 273° C. ; 2° les radiations solaires nous arrivent à travers l'atmosphère, et elles éprouvent dans ce passage une absorption dont il est nécessaire de tenir compte : les recherches faites à ce sujet portent à conclure que, suivant la verticale, notre atmosphère absorbe un quart des rayons calorifiques que le Soleil nous envoie ; pour les rayons obliques, cette absorption augmente proportionnellement à la sécante de la distance zénithale ; 3° enfin, outre la radiation solaire, un thermomètre ainsi exposé reçoit les radiations des corps environnants, et cette circonstance complique singulièrement la question ; car deux thermomètres exposés au Soleil, à la même heure et dans le même lieu donneront des indications très-différentes suivant la nature, la disposition et la distance des corps qui les entourent immédiatement.

Pour déterminer la température du Soleil, il faut connaître : 1° l'intensité de la radiation ; 2° la quantité absolue de force vive thermique que le Soleil communique à la Terre en un temps donné. Nous allons montrer comment on peut évaluer ces éléments ; nous en tirerons ensuite les conséquences relatives à la constitution physique du Soleil et à la conservation de son énergie. Mais, avant d'aborder ces recherches, nous croyons utile d'exposer quelques considérations théoriques.

La Théorie mécanique de la chaleur a conduit les physiciens à admettre que la température des corps est directement proportionnelle à la force vive que possède chaque molécule, et inversement proportionnelle à une autre quantité qui dépend du travail que ces mêmes molécules doivent effectuer pour résister à l'attraction moléculaire et à la pression extérieure. Si le corps est gazeux, l'attraction moléculaire est sensible-

ment nulle ; aux molécules on peut substituer les poids atomiques, et les résultats de cette théorie s'accordent parfaitement avec tous les faits connus.

« Si l'on considère la chaleur, dit M. Clausius, comme un mouvement vibratoire des dernières particules matérielles des corps, et si l'on regarde la température comme mesurant la *force vive* des molécules, on reconnaît que la *force active* de la chaleur est proportionnelle à la température absolue. De plus, le travail mécanique que peut exécuter la chaleur lorsqu'elle passe d'un corps à un autre est proportionnel à la température absolue à laquelle a lieu ce passage (¹). »

Cette force vive moléculaire des corps est celle qui, en se communiquant au milieu éthéré par lequel les vibrations se propagent à distance, produit ce que nous appelons les *radiations*.

Pour les corps qui nous sont accessibles, nous mesurons leur force vive thermique par le travail de dilatation qu'ils font éprouver à un corps connu que nous appelons *thermomètre ;* les indications de ces thermomètres sont toutes rapportées à celles que donnerait, dans les mêmes circonstances, un thermomètre à air. Pour les corps que nous ne pouvons atteindre, ce moyen est impraticable ; nous ne pouvons apprécier la température que par la radiation thermique et par les effets qu'elle produit, mais alors le problème devient beaucoup plus compliqué.

D'abord, si le corps n'est pas gazeux, les liens moléculaires ne peuvent plus être négligés, et il faut tenir compte du

(¹) *Sitzungsberichte der Niederrheinischen Gesellschaft für Natur und Heilkunde.* Bonn, 7 nov. 1870. *Voir* aussi Brusotti, *Atti della S. I. di Milano,* 1873.

On appelle température absolue celle qui est évaluée à partir du zéro absolu, c'est-à-dire à partir du point de l'échelle centigrade où serait marqué le nombre — 273.

second facteur dont nous avons parlé ; dans ce cas, le pouvoir émissif dépend non-seulement de la température du corps, mais encore de l'état moléculaire de sa surface et, s'il est composé, du groupement de ses atomes. Telle est la théorie admise par les physiciens, théorie qui a été confirmée par l'expérience toutes les fois qu'il a été possible de la vérifier.

Quant aux gaz, tant qu'ils sont soumis à une pression peu différente de celle de notre atmosphère, leur pouvoir rayonnant est extrêmement faible ; mais il devient très-énergique lorsqu'on les soumet à des pressions considérables. Ainsi M. Soret ne put obtenir aucune trace de rayonnement en brûlant, à la pression atmosphérique, le mélange de gaz oxyhydrogène, qui produit cependant une flamme d'une température très-élevée ; mais M. Cailletet éclairait parfaitement un vaste laboratoire en faisant jaillir une étincelle de quelques millimètres dans un gaz comprimé à 80 atmosphères.

Les gaz portés à une haute température peuvent donc devenir incandescents, et par conséquent éclairants, s'ils sont fortement comprimés. On peut arriver à un résultat analogue, en les maintenant à la pression ordinaire, par la simple addition de quelques particules solides : tel est le rôle des oxydes métalliques, chaux, magnésie, zircone, etc., dans l'éclairage oxyhydrique ; mais alors il faut bien remarquer que le gaz lui-même ne devient pas incandescent. Il échauffe le corps solide qui est en contact avec lui et l'amène ainsi à la température d'incandescence.

Lorsqu'il s'agit d'une flamme éclairante, on attribue ordinairement l'éclat lumineux qu'elle possède à des particules solides en suspension dans la substance gazeuse. S'il en est ainsi, il faudrait admettre que ces particules solides sont transparentes ; car on sait depuis longtemps qu'un gaz est éga-

lement transparent et lorsqu'il est obscur à la température ordinaire et lorsque la combustion le rend lumineux. Ce fait a été confirmé par les expériences de M. Hirn. « Il faut en conclure, dit ce savant, que la plupart des substances solides deviennent transparentes lorsqu'elles sont en suspension dans une flamme : tels sont les oxydes métalliques qu'on emploie dans les feux d'artifice, etc. Cette loi n'est cependant pas tout à fait générale. »

De tout ce que nous venons de dire, nous devons conclure que *l'incandescence ne suppose pas nécessairement des particules solides et opaques.* Il résulte de là une grande incertitude dans la théorie de la radiation solaire.

Mais il y a une difficulté plus grave encore. Pour remonter de la radiation d'un corps à la température qu'il possède, il faudrait connaître la loi qui relie ces deux phénomènes ; or les physiciens sont loin d'être d'accord sur ce point. Les uns croient, avec Newton, que la radiation est simplement proportionnelle à la température, et d'autres, comme Dulong et Petit, qu'elle croît en progression géométrique lorsque la température croît en progression arithmétique. Il doit donc y avoir une énorme différence entre les résultats, suivant que l'on adopte l'une ou l'autre de ces théories : c'est ce que nous verrons bientôt.

Ces principes étant posés, nous allons expliquer et discuter en détail les méthodes qui ont été employées pour arriver à déterminer la température du Soleil.

§ II. — *Mesure de l'intensité de la radiation solaire.*

Newton est le premier qui ait cherché à déterminer la température du Soleil en mesurant sa radiation. Il se proposait de

trouver la température à laquelle avait dû parvenir la comète de 1680. Pour cela, il exposa au Soleil un thermomètre recouvert d'une couche de terre peu épaisse; il trouva que ce thermomètre s'élevait à 65°, 56 C., tandis qu'à l'ombre la température était de 29°, 44. Appliquant ensuite la loi du carré des distances, il conclut qu'un corps placé à la surface du Soleil serait à une température de 1669300 degrés C. En 1846, nous avons répété à Rome l'expérience de Newton, et nous avons trouvé un résultat peu différent du sien : l'air extérieur étant à 34°, 3, le thermomètre exposé au Soleil marquait 65°, 3.

Mais cette expérience est insuffisante, et les chiffres ainsi obtenus ne peuvent servir de base à un calcul sérieux; car la température d'un thermomètre placé dans ces conditions dépend, non-seulement de la radiation solaire, mais aussi de l'influence exercée par les corps voisins : aussi les résultats obtenus varient-ils d'un jour à l'autre.

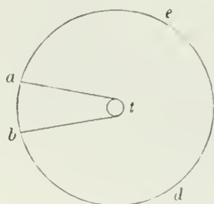
Lorsqu'un corps est exposé au Soleil, les corps environnants rayonnent vers lui ; il s'établit ainsi un échange de radiations entre le thermomètre et l'enceinte dans laquelle il se trouve renfermé, tous les corps rayonnant les uns vers les autres. Lorsque l'équilibre est établi, l'intensité relative des températures que possèdent les parties rayonnantes doit être en raison inverse de la surface de ces mêmes différentes parties de l'enceinte, cette surface étant estimée suivant sa grandeur angulaire vue du corps qui reçoit les radiations. Ainsi, soit *aedb* (*fig.* 215) une enceinte de surface Σ ayant un excès de température ϑ sur le corps thermométrique t; soit S une portion *ab* de cette surface ayant sur l'autre un excès T; on aura la relation

$$TS = \Sigma\vartheta, \quad \text{d'où} \quad T = \vartheta\frac{\Sigma}{S}.$$

Cette équation est toujours vraie, pourvu cependant que la surface $S = ab$ soit une portion assez petite de l'enceinte et que, par suite, elle soit négligeable par rapport à l'enceinte tout entière.

Cette théorie une fois admise, on pourra facilement déterminer la radiation du Soleil, et l'exprimer en prenant pour unité les degrés conventionnels du thermomètre. Pour cela, on exposera un thermomètre au Soleil dans une enceinte de température connue; on lira l'indication t du thermomètre exposé au Soleil, on soustraira la température t' de la sphère

Fig. 215.



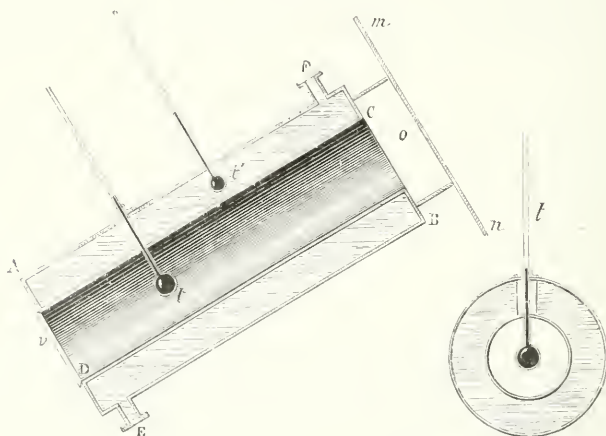
environnante et l'on formera l'excès $\theta = t - t'$. On multipliera θ par le rapport qui existe entre la surface de la sphère et la surface apparente du Soleil. Or, le disque solaire ayant un diamètre moyen de 32′ 3″,6, on trouve le rapport de $\frac{\Sigma}{S} = 183960$, et l'on peut bien négliger l'étendue du disque par rapport à la surface entière de la sphère. On aura donc $T = 183960\,\theta$.

La *fig.* 99 représente l'appareil que nous avons employé à Rome pour déterminer la valeur de $(t - t')$. Il est semblable à celui que M. Waterston a employé aux Indes, et à celui dont M. Soret s'est servi dernièrement sur le Mont-Blanc.

AB et CD (*fig.* 216) sont deux cylindres concentriques soudés l'un à l'autre ; ils forment une espèce de chaudière dont la capacité annulaire peut être remplie d'eau ou d'huile à une température quelconque. On peut même chauffer l'appareil

par un courant de vapeur entrant par la tubulure E, sortant par la tubulure F. A la place de la vapeur on peut employer un gaz, par exemple l'air chaud qui s'échappe de la cheminée d'une lampe. Un thermomètre *t* passe par une tubulure à travers l'espace annulaire et pénètre jusqu'à l'axe du cylindre ; il reçoit les rayons solaires qui sont introduits par un diaphragme *mn* dont l'ouverture *o* est à peine plus grande que la

Fig. 216.



boule du thermomètre. Un verre épais *v* ferme la partie postérieure de l'appareil et permet de s'assurer que le thermomètre est bien placé sur la direction du faisceau de rayons. Le cylindre intérieur et le thermomètre *t* sont recouverts de noir de fumée. Un second thermomètre *t'* donne la température de l'espace annulaire et par conséquent celle de l'enceinte. Tout l'appareil est monté sur un support ayant un mouvement parallactique, afin de suivre avec plus de facilité le mouvement diurne du Soleil. M. Violle a tout récemment modifié cet appareil en donnant à la capacité intérieure la forme sphérique.

L'appareil ayant été exposé au soleil, comme nous l'avons dit, on observe les deux thermomètres; leur différence de température s'élève graduellement, et, au bout de quelque temps, elle finit par devenir constante. Alors on note les deux températures, et l'on en fait la différence $(t - t' = \theta)$. C'est cette valeur qu'on introduit dans l'équation citée plus haut.

Cet appareil a été fortement critiqué par M. Ericsson, qui lui reproche les défauts suivants :

1° La température de l'enceinte ne peut être donnée exactement par le thermomètre unique t'; il faut, dit-il, employer un procédé plus rigoureux. Pour corriger ce défaut, au lieu de laisser un liquide immobile dans l'espace annulaire qui environne l'enceinte, il y fait circuler d'une manière continue un courant d'eau dont la température est bien déterminée. Ce procédé est excellent : aussi M. Soret et M. Violle l'ont-ils adopté. Cependant il ne nous paraît pas absolument nécessaire, car ce qu'on emploie est la différence des thermomètres, et, pourvu qu'on prolonge assez l'expérience, elle se conserve constante pendant des heures.

2° Les thermomètres exposés aux radiations solaires, ne les recevant que sur l'une de leurs faces, ne doivent pas se mettre en équilibre de température dans toutes leurs parties; aussi M. Ericsson assure-t-il qu'il a obtenu des résultats très-différents suivant les thermomètres qu'il employait. Nous croyons qu'il y a là une exagération. Il est possible qu'on trouve des résultats divergents lorsqu'on ne met pas à ces expériences le temps nécessaire, et alors les divergences doivent se produire même lorsqu'on n'emploie pas des thermomètres différents. Mais, lorsqu'on opère à loisir, lorsqu'on laisse l'instrument exposé assez longtemps au soleil, surtout avec le diaphragme *mn* qui le met à l'abri de toute autre radiation (précaution

que M. Ericsson semble avoir oubliée), les expériences se font avec beaucoup de régularité; les anomalies que signale cet illustre savant n'ont jamais été observées ni par M. Soret ni par nous. Nous avons cependant employé successivement plusieurs thermomètres, et les divergences que nous avons trouvées sont du même ordre que celles qui se produisent d'un jour à l'autre en employant le même instrument. De son côté, M. Ericsson a prouvé que les dimensions de l'appareil sont sans influence sur le résultat, et il a substitué au thermomètre un petit réservoir en cuivre rempli d'eau qu'il agite constamment. D'ailleurs, en admettant que cette critique ait un fondement sérieux, il faudrait en conclure que le thermohéliomètre donne un résultat trop faible; et cependant nous allons voir qu'on l'accuse d'attribuer au Soleil une température extravagante!

Voici les résultats que nous avons obtenus en employant différents thermomètres et en prenant les précautions que nous avons indiquées :

1° Dans un grand nombre d'observations faites à Rome sous une pression moyenne de 758 millimètres, à une hauteur de 52 mètres au-dessus du niveau de la mer, la différence des deux températures a été de 12°,06; dans les journées où le ciel était très-pur, elle s'est élevée à 14 degrés.

2° La différence reste constante, quelle que soit la température de l'enceinte, de sorte que, pour $t' = 0°$, on a $t = 12°,06$; pour $t' = 60°$, $t = 72°,06$. Ce résultat peut paraître surprenant, mais nous l'avons vérifié avec soin depuis zéro jusqu'à 64 degrés; M. Waterston a même été jusqu'à 220 degrés en faisant circuler de l'air chaud dans l'appareil. La conclusion théorique qui en résulte, c'est que la surface du disque solaire peut être négligée par rapport à la surface de la sphère. Cependant M. Violle assure qu'il n'a pas retrouvé cette

constance. Ce résultat est-il dû à quelque particularité de son appareil?

3° Lorsqu'on observe en différentes saisons, près du méridien, on obtient des résultats bien moins variables qu'on n'aurait pu l'attendre; la moyenne oscille pendant l'hiver, entre 11°,5 et 12 degrés; pendant l'été, entre 12°,5 et 14 degrés. Cette variation est très-faible, surtout si l'on remarque que, d'une de ces saisons à l'autre, la hauteur du Soleil varie de 47 degrés. Mais il y a un fait encore plus important : si, dans la saison d'été, on fait l'observation quand la hauteur est de 27 ou 30 degrés, la différence des deux températures s'élève à peine à 6 degrés. Il y a donc une cause qui, pour une même hauteur, modifie d'une saison à l'autre la transmission des rayons calorifiques, car cette hauteur est précisément celle que le Soleil atteint au méridien pendant l'hiver. Cette cause consiste manifestement dans la vapeur d'eau, qui est beaucoup plus abondante en été, et qui, pour cette élévation, produit à elle seule une absorption à peu près égale à celle que l'atmosphère entière produit pendant l'hiver. Du reste, cette explication est parfaitement confirmée par les expériences de Tyndall et par celles du professeur Garibaldi, de Gènes, sur le pouvoir absorbant de la vapeur d'eau.

4° En opérant à une plus grande hauteur au-dessus du niveau de la mer, on obtient des différences plus considérables. Ainsi, à Genève, M. Soret a trouvé, pour une altitude de 400 mètres, la valeur moyenne $\theta = 15°,5$; à l'altitude de 2500 mètres, il trouva 18°,6; au sommet du Mont-Blanc, à l'altitude de 4800 mètres, il trouva 21°,13. Sous le ciel plus pur des Indes, le Soleil étant à une hauteur de 70 degrés, M. Waterston a trouvé 27°,8. M. Violle a dernièrement trouvé sur le Mont-Blanc, par un jour calme et beau, la tem-

pérature du thermomètre intérieur $= 18^\circ,20$, la température ambiante étant à 1 degré au-dessus de zéro, et l'enceinte étant à zéro.

On le voit, lorsque les physiciens cherchent à résoudre ce problème si intéressant de la radiation du Soleil, ils rencontrent sur leur chemin des difficultés bien grandes, qui redoublent lorsqu'on veut en conclure la température. Aussi ne prétendons-nous pas exprimer cette température par un nombre précis : nous fixerons seulement la plus petite valeur qu'on puisse lui attribuer, et la question sera ainsi résolue d'une manière bien suffisante.

Si maintenant de la valeur de la radiation θ nous voulons passer à celle de la température, nous sommes en présence des deux théories rivales que nous avons expliquées dans le paragraphe précédent. Si nous suivons l'hypothèse de Newton, nous trouvons que $T = \theta \frac{\Sigma}{S} = \theta \times 183960$. Adoptons pour θ la plus grande valeur qu'on ait obtenue, celle que M. Soret a notée sur le Mont-Blanc, $\theta = 21^\circ,13$, la température du Soleil sera $T = 21^\circ,13 \times 183960 = 3\,987\,075$, c'est-à-dire à peu près quatre millions de degrés ; mais la valeur $\theta = 21^\circ,13$ est évidemment trop petite, car il faut tenir compte de l'absorption atmosphérique. Pour cela, en appliquant les lois connues, il faut ajouter à la différence donnée par les expériences de Soret le nombre $7^\circ,89$. Alors $\theta = 29^\circ,02$, et $T = 5\,334\,840^\circ$, ou, en nombre rond, cinq millions et un tiers. Par le chiffre de M. Violle, on aurait 3 348 072 degrés sans la correction de l'absorption atmosphérique.

Telle serait la température d'un corps situé à la surface du Soleil. Il faut cependant remarquer que l'effet produit sur nos instruments par les radiations du Soleil ne résulte pas seulement de l'action de la couche rayonnante située à la sur-

face de cet astre; si la substance qui le compose jouit d'une certaine transparence, l'action des couches plus profondes doit s'ajouter à celle de la couche superficielle, et le résultat doit être la somme de leurs radiations partielles. Si nous connaissions le degré de transparence de la matière solaire, il ne nous serait pas difficile de calculer sa température; mais l'ignorance dans laquelle nous sommes à cet égard nous met dans le plus grand embarras. Il y a cependant deux choses que nous pouvons affirmer avec certitude :

1° Cette transparence est loin d'être absolue; elle est même très-imparfaite. Nous savons, en effet, que les courants photosphériques, lorsqu'ils se croisent, se cachent l'un l'autre au point d'intersection; les ponts qui traversent les taches empêchent également de voir le bord des pénombres qui sont situées au-dessous d'eux. M. Hirn a prouvé que les flammes sont transparentes; mais il ne regarde pas comme certain qu'on doive attribuer une transparence absolue aux vapeurs métalliques; il a même constaté que la vapeur du magnésium est opaque pendant sa combustion. De plus, les vapeurs métalliques qui se trouvent dans le Soleil possèdent une absorption élective qui est mise en évidence par les observations spectrales et qui montre qu'elles ne sont pas absolument transparentes. Il en est de même de l'hydrogène incandescent qui se trouve dans les protubérances; lorsque deux jets se croisent, ils n'ont pas un éclat plus vif au point d'intersection, ce qui arriverait cependant si les rayons émanés de celui qui est en arrière pouvaient traverser l'autre : ils se cachent réellement l'un l'autre comme des corps opaques. Nous devons conclure de tout cela que la transparence des couches superficielles du Soleil est très-faible, que par conséquent la température qui résulte de notre calcul ne doit pas être très-éloignée de la vérité.

2° Même en admettant que les indications de notre thermomètre résultent des actions combinées de plusieurs couches transparentes, il n'en est pas moins vrai que la température trouvée serait celle d'un thermomètre placé à la surface du Soleil, et par conséquent, même dans cette hypothèse, notre calcul n'est pas déraisonnable.

Si l'on voulait partir du zéro absolu, il faudrait ajouter 273 au nombre trouvé; cette modification, comme on le voit, serait bien insignifiante.

On arriverait à une température encore plus élevée si l'on partait de la valeur $\theta = 27^\circ$ observée aux Indes par M. Waterston, surtout si l'on faisait la correction relative à l'absorption atmosphérique. Ce savant pense que la température du Soleil doit aller à neuf ou dix millions de degrés.

Pour donner une idée de l'état thermique du Soleil, nous ne ferons qu'une seule remarque. En tenant simplement compte de la distance, la température solaire est 46215 fois plus élevée que celle à laquelle peut parvenir un corps situé à la surface de la Terre et en admettant qu'en moyenne la température d'un corps terrestre monte de 22 degrés, nous aurions déjà 1016730 degrés. Pour produire le même effet, il faudrait concentrer sur un espace de 1 centimètre carré les rayons qui tombent sur une surface de $4^m,6$. Or les lentilles à échelons qui n'ont que 1 mètre de surface, et qui absorbent beaucoup de rayons, sont cependant capables de volatiliser la plupart des substances connues. Qu'on juge par là des effets que peut produire la température du corps solaire!

§ III. — *Discussion des résultats obtenus par d'autres savants.*

Les résultats dont nous venons de parler dans le paragraphe précédent ont paru tellement exagérés que beaucoup de personnes n'ont pas hésité à les déclarer absurdes. Comme on ne pouvait pas révoquer en doute l'exactitude des expériences qui ont servi de point de départ à nos raisonnements et à nos calculs, on s'est rejeté sur la loi de Newton, et l'on a déclaré qu'elle est fausse, au moins dans l'application que nous en avons faite dans le cas actuel. M. Vicaire a préféré se servir de la loi de Dulong et Petit, et, prenant comme base de son calcul le nombre que nous avons adopté, $\theta = 29°,02$, il a trouvé que la température du Soleil doit être de 1398 degrés C. Cette valeur est à peu près égale à celle que Pouillet avait trouvée en partant de la même loi ; elle est si peu élevée que nous avions cru devoir la rejeter, précisément parce qu'elle est évidemment beaucoup trop faible. Cette température est à peine plus élevée que celle où la fonte de fer entre en fusion, et, comme il nous paraît impossible d'admettre un résultat aussi faible, nous avons regardé comme fausse la méthode qui y conduit ([1]).

M. Ericsson a étudié cette question avec beaucoup de soin ; il s'est servi d'un instrument de son invention pour déterminer la valeur de la radiation solaire, et, la Terre étant à l'aphélie, il a trouvé 84°,84 F. ou 47°,13 C. Ce nombre est le plus élevé de ceux qu'il a trouvés dans ses différentes expé-

([1]) Rappelons en deux mots en quoi consiste la différence entre les deux méthodes de calcul ; t étant la température du thermomètre exposé à la radiation, t' celle de l'enceinte, on a, d'après Newton $t - t' = \alpha.\mathrm{T}$, tandis que, d'après Dulong et Petit, $a^t - a^{t'} = \alpha a^{\mathrm{T}}$; dans ces équations, $\alpha = \frac{1}{183960}$, et $a = 1,0077$.

riences, et nous pensons qu'il vaut mieux en effet s'en tenir au maximum. Afin qu'on ne puisse pas nous accuser d'avoir exagéré, nous avions pris la moyenne de nos différents résultats. M. Ericsson, ayant multiplié ce nombre 47,13 par le rapport inverse du carré de la distance, a trouvé pour température de la photosphère 2230000 degrés C.; puis, pour tenir compte de l'absorption chromosphérique, il a ajouté une correction, trop petite selon nous, qui lui a donné comme valeur définitive 2290000 degrés C. Cette valeur est moitié plus petite que la nôtre, mais elle est bien plus grande que celle à laquelle M. Vicaire a cru devoir s'arrêter.

M. Zöllner a employé une méthode absolument différente pour résoudre la même question : il a cherché à déterminer la température du Soleil en partant de la vitesse avec laquelle sont lancés les gaz qui constituent les protubérances. Il suppose que ces gaz sortent de l'intérieur du globe solaire par des orifices pratiqués dans une couche liquide ou solide, et que leur mouvement est déterminé par une pression énorme qu'il évalue à 4070000 atmosphères. Sa conclusion est que, dans l'atmosphère du Soleil, la température des gaz est au moins de 27700 degrés; à l'orifice par où sortent les gaz, la température serait plus élevée : elle arriverait à 68400 degrés pour une protubérance ayant une hauteur de 1′30″, et à 74910 degrés si la hauteur atteint 3 minutes.

Les savants français pensent généralement que la température du Soleil ne dépasse pas 2000 ou 3000 degrés. D'après M. Fizeau, elle serait environ deux fois et demie plus élevée que celle de l'arc voltaïque. M. H. Sainte-Claire Deville admet qu'elle ne dépasse pas de beaucoup celle à laquelle se produit la dissociation des composés chimiques. La valeur minimum donnée par Zöllner serait huit fois plus considérable que la température de la flamme oxyhydrique.

Telles sont les opinions extrêmes adoptées par les savants. On voit qu'elles sont aussi divergentes que possible ; c'est pourquoi il nous semble qu'il y a lieu de rechercher et de discuter les causes de cette divergence.

Les erreurs peuvent provenir ou de l'expérience ou du calcul. On a beaucoup critiqué notre méthode expérimentale, et cependant nous la regardons encore comme la meilleure, surtout avec les perfectionnements introduits par M. Ericsson et adoptés par M. Soret. La manière dont varient les résultats obtenus en différentes circonstances et en différents pays prouve que les défauts reprochés à cet instrument n'ont pas une aussi grande influence qu'on l'a prétendu. On reconnait que les dimensions du thermohéliomètre sont indifférentes ; dès lors, celles du thermomètre ne doivent pas avoir autant d'importance qu'on l'a prétendu à la suite de nos observations.

Nous trouvons, au contraire, qu'il y a de grands inconvénients à opérer comme Newton, qui se contentait d'exposer le thermomètre au Soleil ; le résultat doit être singulièrement influencé par les courants d'air et par le rayonnement des corps voisins. Depuis quelque temps, on emploie en Angleterre des thermomètres à boule noire enfermés dans des globes de verre où l'on a fait le vide avec la machine pneumatique ; ces appareils donnent probablement un résultat trop élevé, à cause des réflexions qui ont lieu sur la paroi intérieure du globe de verre.

Ce n'est donc pas sur l'expérience elle-même que doit porter la discussion, mais sur la manière d'interpréter et de calculer les résultats. Laquelle des deux formules devons-nous admettre, celle de Newton ou celle de Dulong et Petit ? La loi de Newton est incontestable si on la considère comme étant la loi élémentaire de la propagation de la chaleur dans

des corps d'une conductibilité parfaite. Celle de Dulong et Petit n'est applicable qu'aux corps solides et aux corps liquides dans l'étendue de l'échelle thermométrique pour laquelle elle a été vérifiée par l'expérience. Les savants qui l'ont énoncée les premiers n'ont pas poussé leurs recherches au delà de la température d'ébullition du mercure, quoique Pouillet assure que les expériences ont été continuées jusqu'à 1000 degrés. Il est donc impossible de s'en servir pour la question qui nous occupe en ce moment; car la température du Soleil est évidemment supérieure, et de beaucoup, aux limites auxquelles on doit borner son application. De plus, comme le fait très-bien observer M. Ericsson, elle n'est pas générale, puisqu'elle dépend de la constitution des corps. Dulong et Petit, dans leurs expériences, n'ont pas eu soin de faire disparaître l'influence de cet élément; d'ailleurs c'était impossible, car les corps employés, solides ou liquides, n'ont pas une conductibilité parfaite. Au reste, M. Ericsson a fait à ce sujet des expériences tout à fait décisives, en se servant d'un réservoir en cuivre rempli d'eau qu'on agitait constamment, le tout étant renfermé dans une enceinte vide et maintenue à une température constante. La conclusion de ces expériences a été que la loi de Dulong et Petit ne peut pas être appliquée entre 19 et 100 degrés, tandis que, pour la loi de Newton, il n'y a qu'une différence à peine appréciable entre les résultats calculés et les résultats observés. De plus, il a étudié le pouvoir rayonnant en se servant d'une masse de fer fondue et chauffée à 3000 degrés F., c'est-à-dire à 1666 degrés C. Il a trouvé que, à cette température, le pouvoir rayonnant est environ 4,21 fois plus grand qu'à 65 degrés, tandis que, d'après la loi de Dulong et Petit, il devrait être 4000 fois plus considérable. M. Ericsson employait dans ses expériences plusieurs tonnes de fer fondu et surchauffé à 1666 degrés; si

la température du Soleil était du même ordre, la force rayonnante de cet astre serait à peu près la même. Or, en limitant à un pied carré la surface rayonnante du métal, M. Ericsson a obtenu 1013 unités thermiques, tandis que, pour le Soleil, il en trouve 312500, c'est-à-dire 310 fois plus. Il faut en conclure que la température solaire est d'un ordre bien plus élevé, et, encore une fois, que la loi de Dulong et Petit est absolument fausse. Et, ce qui rend encore bien plus évidente la fausseté de cette loi, c'est que le résultat auquel on parvient pour la température du Soleil dépendrait de la température même de l'enceinte ou de l'actinomètre !

Faut-il donc accepter, les yeux fermés, la loi de Newton ? C'est ce que nous allons examiner maintenant. M. Soret a fait à Genève une série d'expériences extrêmement intéressantes : il a fait agir sur son instrument perfectionné, d'abord le Soleil, puis un morceau de zircone, rendu incandescent par la flamme due à un mélange d'hydrogène carboné et d'oxygène. Sous l'influence de la radiation solaire, la température s'est élevée à 14°,5 ; avec la zircone, en disposant l'expérience de telle sorte que la surface rayonnante sous-tendît le même angle que le Soleil, la température s'est élevée de 0°,25 ; la radiation solaire serait donc seulement 58 fois plus intense que celle de la zircone. La température de l'actinomètre était maintenue à 16°,63. Si, avec ces données, on calcule la température de la zircone, on trouve, en employant la formule de Newton, 45990 degrés, nombre évidemment trop fort. Avec la formule de Dulong et Petit, on trouve 781 degrés ; ce nombre, à son tour, est beaucoup trop faible, car la température de la zircone est au moins de 1500 degrés, et probablement de 2000 degrés. Nous devons donc conclure de ces expériences que la loi de Newton et celle de Dulong s'éloignent de la vérité chacune de leur côté.

M. H. Sainte-Claire Deville pense, d'après sa longue expérience des températures élevées, que la température solaire ne dépasse pas beaucoup celles que nous produisons et mesurons dans nos laboratoires. Outre cette longue expérience que nous ne saurions ni contester ni discuter, le savant chimiste appuie son opinion sur deux raisons positives : c'est d'abord l'impossibilité matérielle de mesurer ces températures élevées, et en second lieu les modifications que peuvent éprouver les lois des actions moléculaires dans des circonstances aussi différentes de celles que nous connaissons. Il est bien certain, en effet, qu'à ces températures *excessives* tous les thermomètres connus seraient fondus et volatilisés ; aussi n'avons-nous jamais supposé qu'on dût nous faire une semblable objection, comme si l'impossibilité matérielle de mesurer directement une grandeur quelconque était une raison de nier son existence ou d'affirmer qu'il est impossible de l'évaluer approximativement d'une autre manière. Nous ne prétendons pas non plus que les dilatations et les autres fonctions moléculaires suivent les mêmes lois lorsque les corps se trouvent dans des conditions thermiques aussi exceptionnelles. Nous prétendons seulement que, si l'on veut appliquer les lois connues, en n'accordant au Soleil qu'une température de 2000 ou 3000 degrés, l'énorme radiation calorifique de cet astre est absolument inexplicable ; que cette même radiation ne peut être expliquée, d'après les mêmes lois, que par un état calorifique absolument différent, état dont nous ne saurions préciser la manière d'être, mais que nous exprimons d'une façon hypothétique en énonçant un nombre de degrés très-considérable. D'ailleurs, nous pouvons ajouter à toutes ces considérations un fait qui nous paraît décisif : dans les belles expériences de M. H. Sainte-Claire Deville sur la fusion du platine par la flamme du gaz oxyhydrique, auxquelles

nous eûmes le bonheur d'assister dans le laboratoire de ce savant, nous avons observé les *bandes* de l'oxyde de calcium et jamais les *raies* de ce métal. Or le Soleil nous présente exclusivement les *raies* et jamais les *bandes* du calcium, ce qui montre que sa température dépasse de beaucoup celles que nous produisons et mesurons dans nos laboratoires.

M. Fizeau évalue la température du Soleil en prenant comme terme de comparaison celle de l'arc voltaïque obtenu avec cinquante couples de Bunsen, grand modèle; il s'agit de la température de l'arc qui sépare les deux charbons, et non de celle des charbons eux-mêmes, et M. Fizeau arrive à ce résultat que la température du Soleil est deux fois et demie plus élevée. Remarquons d'abord que cette température de l'arc est inconnue. Le platine, qui ne fond qu'à 2500 degrés au moins, coule comme la cire lorsqu'on l'introduit dans l'arc voltaïque. Les expériences de M. Fizeau ont été faites par la Photographie, et il y a bien à redire à ce procédé. D'abord, l'impression produite sur la couche sensible est presque uniquement due aux charbons; car l'arc lui-même, quoiqu'il soit plus chaud assurément, n'a qu'un pouvoir photogénique très-faible, comme il est réellement très-peu lumineux. Et d'ailleurs, peut-on supposer que les radiations calorifiques soient proportionnelles aux radiations chimiques ?

Il est certain cependant que l'arc électrique possède un avantage incontestable : de toutes les sources artificielles de chaleur, c'est celle dont la température est le plus élevée, ce qui permet de la comparer plus facilement avec le Soleil. Nous avons donc comparé ensemble ces deux radiations, en employant le même thermohéliomètre [1], le courant étant

---

[1] Voir *Mem dell' Acc. dei Nuovi Lincei*; 1874.

produit par une pile de cinquante couples de Bunsen, grand modèle : nous avons trouvé que la radiation du Soleil, en la supposant égale à 21°, 13, est 44,36 fois plus grande que celle de la lumière électrique. On voit que ce résultat diffère beaucoup de celui de M. Fizeau. Supposons que la température des charbons soit de 3000 degrés seulement, nous trouverons pour le Soleil le nombre de 133080 degrés, qui ne peut être considéré que comme un minimum.

M. Fizeau a fait encore d'autres expériences en employant comme terme de comparaison la chaux rendue incandescente par la flamme du gaz oxyhydrique. Il a trouvé que les deux radiations sont entre elles comme 6,86 est à 1000. Supposons que la température de la chaux soit de 1680 degrés, ce qui nous paraît bien modeste, nous trouvons pour le Soleil 233576 degrés. M. Soret a fait des expériences semblables à Genève, en employant la zircone au lieu de la chaux ; les résultats qu'il a obtenus nous donneraient, pour la température du Soleil, 126000 degrés. Tous ces nombres ne nous paraissent pas approcher de la véritable température du Soleil ; car il y a beaucoup de causes qui tendent à diminuer les résultats, mais ils montrent au moins combien on s'écarte de la vérité en s'arrêtant, avec les physiciens français, à 3000 ou 5000 degrés.

Nous verrons bientôt qu'on arrive au même résultat en employant d'autres procédés pour évaluer l'énergie thermique du Soleil. M. Ericsson, qui avait déclaré nos chiffres absurdes et extravagants, admet cependant que la température solaire ne peut être inférieure à 2250000 degrés C ; et cependant il n'a pas tenu un compte suffisant de l'absorption due à l'atmosphère terrestre. On admet généralement, et avec raison, que, suivant la verticale, notre atmosphère arrête le quart des rayons calorifiques ; en admettant ce nombre, M. Ericsson au-

rait trouvé pour résultat 2729700 degrés. De plus, il n'a tenu compte, pour le Soleil lui-même, que de l'absorption très-faible produite par la chromosphère; il faudrait, pour être dans le vrai, tenir compte des rayons qui sont absorbés dans la couche la plus basse de l'atmosphère solaire : cette absorption est considérable, et c'est elle qui donne naissance aux raies de Fraunhofer.

Les nombres auxquels nous sommes parvenu en appliquant la loi de Newton peuvent être exagérés, nous en convenons volontiers. Nous savons, en effet, que le pouvoir rayonnant varie avec l'état du corps : ainsi l'eau rayonne d'une manière très-différente suivant qu'elle est à l'état solide, liquide ou gazeux; mais, comme les matières qui composent la couche superficielle du Soleil sont à l'état de fluide élastique, leur rayonnement doit être plus faible qu'on ne le suppose, et, par suite, la loi de Newton doit nous conduire plus près de la vérité que celle de Dulong et Petit.

Les observations spectrales nous apprennent que l'atmosphère du Soleil contient des quantités considérables de vapeur de fer. Comment supposer que la température atteint à peine le point de fusion de ce métal ? Dans les creusets où l'on fait fondre le fer, on n'observe point les raies que produirait sa vapeur, à moins qu'il n'y ait combustion du métal, comme cela a lieu dans le convertisseur de Bessemer; alors, en effet, la combustion produit de la chaleur et élève la température bien au-dessus du point de fusion.

On a objecté que, la température de cette vapeur n'étant pas de quelques millions de degrés, la comparaison ne prouvait rien. Il faut pourtant s'entendre. La température moyenne de cette couche, où l'on voit ces raies, n'a sans doute pas des millions de degrés : personne ne le prétend. Mais connaît-on la véritable température ou plutôt la force vive de ces petites

molécules à l'instant de leur combinaison avec l'oxygène? Assurément non. On connaît la température du mélange avec les vapeurs et l'air ambiants ; mais on ne connaît pas celle des atomes au moment de la combinaison.

Nous pouvons éclaircir cela par une comparaison. Un tube capillaire de Geissler, contenant un filet d'hydrogène *raréfié*, est plongé dans un calorimètre à eau. L'expérience prouve que 100 grammes d'eau s'échauffent de 5 degrés C. en une minute de temps. La même quantité de chaleur élèverait donc 500 grammes de 1 degré. Supposons le poids de l'hydrogène renfermé dans le tube égal à $0^{gr},0001$; la chaleur de ce dix-millième de gramme suffit à échauffer de 1 degré une masse d'eau 5 000 000 de fois plus grande, et, en prenant la capacité de l'hydrogène = 3,4, on trouve, pour sa température probable, 1 470 588 degrés. Si ce raisonnement est juste, on peut être étonné de l'énorme température qui règne dans l'étincelle électrique ; mais cette température est directement inappréciable, car la petitesse de la masse fait que la chaleur se distribue aux corps environnants avec une rapidité extraordinaire, et nous ne pouvons ainsi constater que la température du mélange, où les masses froides sont infiniment plus considérables que les masses incandescentes. Il en résulte que nous ne voyons pas nos verres se fondre, bien qu'ils se décomposent et s'échauffent considérablement dans leur masse, énorme en proportion de celle du gaz incandescent.

Telle *peut être* la température des atomes au moment de la combinaison ; mais, comme ils sont environnés de masses absorbantes énormes, leur chaleur s'y trouve comme noyée, et il ne reste qu'une température moyenne relativement très-faible. Si maintenant toute la masse solaire était dans la même condition, quelle difficulté verrait-on à y admettre des millions de degrés?

Mais revenons à l'expérience de l'appareil Bessemer. On a dit que le fer en fusion peut produire des vapeurs qui s'élèvent au-dessus de la couche liquide, absolument comme les vapeurs d'eau qui se produisent et se répandent de tous côtés, même à une température assez basse ; mais cette objection n'a pas de valeur, puisque, encore une fois, le spectroscope ne nous fait voir aucune des raies du fer au-dessus des creusets où il est en simple fusion. D'ailleurs la comparaison des vapeurs de ce métal avec la vapeur d'eau ne peut se soutenir; car il faut tenir compte de la tension particulière à chaque substance et de la vitesse avec laquelle se produit sa volatilisation, vitesse qui dépend de la force expansive. L'eau est, de toutes les substances, celle qui s'évapore le plus vite, après l'hydrogène et quelques autres composés du même gaz. M. Brusotti a évalué à 614 la vitesse d'évaporation de l'eau, tandis que celle du mercure est à peine égale à 184, et cependant ce métal est bien plus volatil que le fer. Nous voyons par là que, si l'on veut donner aux vapeurs du fer une tension de 1 atmosphère, il faudra, après avoir fait fondre ce métal, élever la température beaucoup plus qu'on ne le fait pour l'eau en proportion de ses points de fusion et de volatilisation

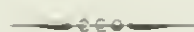
Quant aux résultats de M. Zöllner, nous trouvons qu'ils ont une assez grande probabilité, si on les applique à ces couches superficielles qui sont refroidies par la dilatation et le rayonnement. Remarquons que ces chiffres sont assez élevés pour qu'on ne puisse pas en faire un argument en faveur de cette croûte solide ou liquide dont nous repoussons l'hypothèse comme absolument incompatible avec les faits observés. Évidemment les couches les plus voisines de la surface ne peuvent pas avoir toutes la même température, et celles qui sont plus exposées au rayonnement doivent se re-

froidir plus vite, comme il arrive au sommet de nos montagnes et dans les hautes régions de notre atmosphère ; mais ces couches plus extérieures sont assez transparentes pour donner passage aux radiations qui viennent des couches plus profondes. Toutes ces actions calorifiques s'ajoutent l'une à l'autre, et de leur somme il résulte une action unique à laquelle on a donné le nom de *température virtuelle :* c'est la température que devrait posséder un corps situé à la surface du Soleil pour produire à lui seul un rayonnement identique à celui de la couche dans laquelle il se trouve plongé et des couches plus profondes; mais nous avons déjà dit combien cette transparence est limitée.

Tout ce que nous venons de dire s'applique uniquement aux couches superficielles que peuvent atteindre nos moyens d'investigation ; quant à la masse intérieure, nous n'avons aucune donnée positive qui nous permette d'évaluer sa température. Nous pouvons seulement dire que cette température est nécessairement plus élevée que celle de la surface, car c'est ce qui a lieu pour tous les globes célestes. D'ailleurs l'atmosphère de vapeurs métalliques qui environne le Soleil, bien qu'elle n'ait pas une grande épaisseur, exerce une absorption considérable sur les radiations de cet astre, ainsi que le prouvent les raies de Fraunhofer. Cette absorption empêche la diffusion de la chaleur ; c'est ainsi que la couche d'air qui nous environne produit sur le globe terreste l'effet d'un vêtement imperméable à la chaleur, ou mieux celui d'un châssis vitré qui, sans arrêter la chaleur lumineuse qui nous vient du dehors, empêche la diffusion de la chaleur obscure qui tend à s'échapper dans les espaces célestes. Si le Soleil était privé de l'atmosphère qui l'environne, il nous paraîtrait de 7 à 10 fois plus brillant. M. Ericsson et M. Lockyer commettent une erreur évidente lorsqu'ils se bornent à évaluer l'absorption due

à la chromosphère, couche très-mince et transparente pour tous les rayons, excepté ceux qui émanent de l'hydrogène.

En nous appuyant sur toutes les considérations que nous venons d'indiquer, nous croyons pouvoir conclure que, sans regarder comme irréformable le chiffre de 5 000 000 de degrés auquel nous sommes parvenu, on est cependant moins éloigné de la vérité en l'admettant qu'en s'arrêtant à quelques milliers de degrés. Nous ajouterons même que le nombre de 10 millions de degrés proposé par M. Waterston n'est pas aussi absurde qu'on a voulu le dire. Enfin, s'il faut fixer une valeur minimum, nous pensons qu'il est impossible de descendre au-dessous de 1 ou 2 millions de degrés.



CHAPITRE II.

ORIGINE ET CONSERVATION DE LA CHALEUR SOLAIRE.

§ I. — *Quantité absolue de chaleur émise par le Soleil.*

Dans le Chapitre précédent, nous avons exprimé la température solaire en degrés conventionnels ; mais, pour évaluer la force vive et la quantité d'énergie qui réside dans cet astre, il faut l'exprimer en quantité absolue de chaleur, en rapportant cette quantité à une unité déterminée de travail thermique. Ce travail est mesuré par l'échauffement que subit, pendant l'unité de temps, un corps ayant un poids déterminé et une capacité calorifique connue. L'appareil qu'on emploie à cet effet a été imaginé par M. Pouillet. Il se compose d'un cylindre de cuivre très-mince A (*fig.* 217). L'une de ses bases est recouverte de noir de fumée ; cette base est exposée directement aux rayons du Soleil qui sont perpendiculaires à sa surface. Le cylindre est rempli d'eau ; on détermine sa température au moyen d'un thermomètre T renfermé à l'intérieur du réservoir.

Cet appareil étant exposé au Soleil, on note l'accroissement de température qui se produit en une *minute ;* cet accroissement constitue le chiffre qui doit servir de point de départ au calcul. On doit tenir compte du vase et de la quantité de chaleur qu'il absorbe ; pour cela, on multiplie son poids par sa chaleur spécifique : ce produit s'appelle le poids du vase réduit en eau ; il suffira de l'ajouter au poids de l'eau sur laquelle on opère.

Il faut encore tenir compte d'une cause d'erreur qu'on ne

saurait éviter L'appareil rayonne constamment autour de lui, et il perd ainsi une quantité de chaleur d'autant plus grande que sa température est plus élevée ; l'échauffement produit en une minute résulte donc de la différence entre la quantité de chaleur reçue et la quantité de chaleur émise. Pour tenir compte de cette différence, on détermine par une seconde ex-

Fig. 217.



périence le nombre de degrés dont s'abaisse la température du cylindre, lorsqu'il est soustrait à l'influence des rayons solaires ; on ajoute ce nombre à celui qu'on a trouvé dans la première expérience, et la somme exprime l'échauffement définitif tel qu'on le mesurerait si cette cause d'erreur n'existait pas. Cette compensation n'est pas absolument exacte, mais les savants ont à leur disposition des méthodes de correction plus parfaites, que l'on pourra employer si l'on veut obtenir une plus grande précision.

On doit encore ajouter une correction importante, pour tenir compte de la quantité de chaleur absorbée dans le trajet des rayons à travers notre atmosphère. Le résultat étant ainsi modifié, tout est prêt pour le calcul.

Ce procédé est assez simple ; il contient plusieurs causes d'erreurs, mais c'est encore le meilleur que l'on ait employé jusqu'à présent. M. Ericsson, tout en le critiquant, assure que, moyennant des compensations qu'il n'indique pas, il fournit des résultats assez exacts : cela nous suffit.

Le résultat des expériences faites avec l'appareil de Pouillet peut être énoncé de la manière suivante : 1 gramme d'eau exposé au rayonnement solaire, à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, sur une surface de 1 centimètre carré, s'échauffe en une minute de $1°,763$. De là on peut déduire la quantité totale de chaleur qui tombe sur l'hémisphère terrestre ; elle est égale à la radiation comprise dans la section d'un cône circonscrit à la Terre et au Soleil, cette section étant faite auprès de la Terre : c'est à peu près la surface d'un grand cercle, et, par conséquent, le quart de la surface terrestre. La radiation solaire pourrait donc échauffer de $\frac{1°,763}{4}$ ou de $0°,44075$ une couche d'eau ayant 1 centimètre d'épaisseur et uniformément répandue sur toute la surface de la Terre. Dans le cours d'une année, cette même couche s'échaufferait de $0°,44075 \times 60 \times 24 \times 365,25 = 231\,855°$, en supposant qu'elle ne perde pas de chaleur par l'évaporation et par la radiation. Si l'épaisseur était de 1 mètre, la température s'élèverait en une année de $2318°,55$.

On peut encore exprimer la quantité de chaleur que nous recevons du Soleil par l'épaisseur de la couche de glace qu'elle ferait fondre en un temps donné ; on la détermine en divisant le nombre déjà trouvé par la chaleur latente de fusion de

la glace ; on trouve ainsi que, dans le courant d'une année, la radiation solaire serait capable de faire fondre une couche de glace ayant une épaisseur de $30^m,89$, c'est-à-dire 31 mètres en nombre rond. Les derniers chiffres de ce résultat différeront un peu, suivant les données qu'on aura adoptées comme éléments du calcul : ainsi, par exemple, M. Schellen trouve $29^m,33$; mais il n'y a pas lieu de s'arrêter à discuter ces nombres, car l'approximation à laquelle nous sommes parvenus est bien suffisante pour le but que nous nous proposons.

Nous pouvons maintenant évaluer la quantité de chaleur émise à la surface même du Soleil en multipliant la valeur précédente par le carré de la distance du Soleil à la Terre exprimée en rayons du globe solaire. On trouve ainsi que cette quantité de chaleur peut en une minute élever de $816^\circ,71$ la température d'une couche d'eau de 1 mètre d'épaisseur, ou fondre dans le même temps une couche de glace de $10^m,7$.

La Physique moderne regarde la chaleur comme un mode particulier de mouvement moléculaire, et l'activité thermique comme un travail mécanique. Nous pouvons donc, en partant des principes de la Thermodynamique, évaluer en unités mécaniques la radiation solaire ; nous pouvons aller plus loin, et tenter de déterminer la cause qui produit cette radiation et la maintient sensiblement constante pendant un laps de temps très-considérable.

Nous venons de voir que le Soleil, à sa surface, peut, en une minute, échauffer de $816^\circ,71$ une couche d'eau ayant 1 mètre d'épaisseur, ou, ce qui revient au même, échauffer de 1 degré une couche d'eau de $816^m,71$. En une seconde, l'effet serait soixante fois moins considérable, et le Soleil échaufferait de 1 degré une couche d'eau de $13^m,61$. Nous de-

vons supposer que l'action est la même sur toute la surface solaire, mais, pour plus de simplicité, nous considérerons ce qui se passe sur une surface de 1 mètre carré. La couche d'eau ainsi échauffée de 1 degré en une seconde pèsera 13610 kilogrammes. Or la force vive qui, par sa transformation complète en chaleur, serait capable d'élever de 1 degré la température de 1 kilogramme d'eau, équivaut à 424 kilogrammètres, chaque kilogrammètre étant le travail nécessaire pour élever un poids de 1 kilogramme à 1 mètre de hauteur. Ainsi, pour évaluer en kilogrammètres la puissance thermique de 1 mètre carré de la surface solaire, il faut multiplier 13610 par 424; le produit 5770640 exprime le nombre de kilogrammètres cherché : ce travail équivaut à 76942 chevaux-vapeur, le cheval-vapeur étant une force capable de produire en une seconde un travail de 75 kilogrammètres.

On voit donc qu'il suffirait de la chaleur dépensée sur quelques mètres carrés pris à la surface du Soleil pour faire fonctionner toutes les machines à vapeur qui fonctionnent sur notre globe. Une des plus grandes machines qui aient été construites, celle de la frégate *le Friedland*, qui figurait en 1867 à l'Exposition universelle de Paris, avait une force de 4000 chevaux, et exigeait, pour produire la vapeur qui lui était nécessaire, huit chaudières tubulaires brûlant environ 5 tonnes de charbon par heure.

On pourrait aussi évaluer la puissance mécanique à laquelle équivaut la radiation totale de la surface solaire. On trouverait ainsi un nombre de chevaux-vapeur égal à 470 quintillions, c'est-à-dire 470×10^{18}. Telle est l'immense puissance qui émane du Soleil et dont il nous est impossible de nous faire une idée exacte. Nous pouvons bien aligner un nombre suffisant de chiffres pour la représenter, mais ce nombre

ne dit rien à notre imagination, qui est impuissante à le concevoir.

On peut encore apprécier la température du Soleil en considérant le travail que représente la chaleur qu'il émet par le rayonnement. En comparant cette chaleur à celle de nos locomotives, on a trouvé que sur 1 mètre carré de la surface solaire il se dégage au moins autant de chaleur que sur une grille de 80 mètres carrés. Supposons cette évaluation exacte, ce qui pourrait être bien contesté : il en résulte que, si la température de nos fournaises est de 1500 degrés, celle du Soleil sera de 120000 degrés. Ce résultat, certainement trop faible, est cependant bien supérieur à celui qui est proposé par certains physiciens. Nous disons trop faible, car M. Crova a dernièrement démontré que ces valeurs, assignées par M. Pouillet aux calories solaires qui tombent sur l'atmosphère terrestre, sont notablement au-dessous de la vérité; mais ces évaluations n'étant qu'une première approximation, ce que nous venons d'en dire pourra suffire.

§ II. — *Des pertes de chaleur qu'éprouve le Soleil.*

Nous venons d'évaluer l'immense quantité de chaleur qui émane à chaque instant du Soleil, et les nombres que nous avons déterminés mesurent les pertes d'énergie que subit pendant chaque seconde cette masse incandescente. De là on est naturellement conduit à se demander s'il est possible que, malgré un rayonnement aussi considérable, le Soleil ait une température constante, et quelles sont les sources de chaleur qui peuvent compenser des pertes aussi considérables.

Il faut d'abord remarquer que la radiation ne se produit que dans une couche très-mince au-dessous de la surface ; il

est donc bien possible qu'à l'intérieur la température soit encore plus élevée. Mais, les masses refroidies par le rayonnement se mélangeant sans cesse avec les autres, le globe solaire, pris dans son ensemble, perd réellement de la chaleur, et le problème de la constance de température reste toujours à résoudre.

Pour évaluer exactement l'abaissement de la température solaire, il faudrait connaître ce qu'on appelle, dans le langage des physiciens, sa *capacité calorifique*, ou du moins faire à ce sujet une hypothèse plausible. On sait, en effet, que, pour une même quantité de chaleur, les corps ne s'échauffent pas également; par exemple, la quantité de chaleur qui élèvera seulement de 1 degré la température de 1 kilogramme d'eau suffira pour échauffer de 9 degrés un égal poids de fer. Il résulte évidemment de cette propriété que, pour deux masses égales, mais de natures différentes, la durée du refroidissement sera, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à leurs capacités calorifiques. Ainsi donc, à masse égale et en partant d'une même température, le fer se refroidira neuf fois plus vite que l'eau.

Pour le Soleil, il nous est impossible d'assigner rigoureusement sa capacité pour la chaleur, car nous ne connaissons pas avec exactitude tous les matériaux dont il est composé ; mais nous savons qu'il est composé d'hydrogène et de vapeurs métalliques. A part l'hydrogène, dont la chaleur spécifique est 3,41, celle de l'eau étant 1, toutes les autres vapeurs ont une capacité inférieure à 0,5. Nous ne saurions donc admettre, pour capacité moyenne, un nombre plus grand que l'unité, et nous pouvons au plus prendre ce nombre comme limite supérieure.

On peut connaître avec plus de précision la surface du Soleil, son volume, sa masse, sa densité moyenne.

La surface, exprimée en mètres carrés, est représentée par le nombre

$$6032900000000000000 = 60329 \times 10^{14}.$$

Le volume, exprimé en mètres cubes, est représenté par le nombre

$$1393350000000000000000000000 = 139335 \times 10^{22}.$$

La densité de l'eau distillée étant prise pour unité, celle du Soleil est 1,42, et son poids, exprimé en kilogrammes, est représenté par le nombre

$$M = 1946600000000000000000000000000 = 19466 \times 10^{26}$$

ou, en nombre rond, deux nonillions de kilogrammes.

Nous avons vu qu'en une minute, sur un mètre carré, il émet une quantité de chaleur capable d'élever de 816°,71 la température de 1 mètre cube ou de 1000 kilogrammes d'eau, ce qui représente 816710 calories (¹). Il en résulte que, pendant une année, chaque mètre carré perd un nombre de calories égal à 429552000000, ce qui fait pour la surface entière une quantité $C = 25914 \times 10^{26}$.

Supposons que la capacité moyenne de la masse solaire pour la chaleur soit égale à celle de l'eau, le nombre M exprimera les calories que doit perdre le Soleil pour que sa température s'abaisse de 1 degré ; C étant le nombre de calories qu'il perd en une année, l'abaissement annuel de température sera $\frac{C}{M} = 1°,33$ (²). Le résultat deviendrait 2°,8 si le Soleil avait une

(¹) On appelle *calorie*, en Physique, la quantité de chaleur nécessaire pour élever de zéro à 1 degré C. la température de 1 kilogramme d'eau.

(²) Dans l'édition allemande, M. Schellen a modifié un peu ces chiffres ; je ne sais

capacité calorifique égale à celle de la vapeur d'eau, et, par conséquent, un peu supérieure à celle des vapeurs métalliques.

On voit déjà que l'intérieur du Soleil ne saurait être ni obscur ni solide. Si nous le supposions incandescent comme le fer fondu, à une température de 2000 ou 3000 degrés, il suffirait, pour abaisser sa température à zéro, d'une période bien plus courte que les époques historiques les mieux connues. En effet, en 5000 ans, l'abaissement de température dû au rayonnement serait de 6500 degrés, de sorte que, même en admettant que la température initiale ait été de 10000 degrés, elle se trouverait diminuée des deux tiers environ. Ce résultat est impossible; on ne peut donc regarder le Soleil comme une masse simplement incandescente à une température qui ne soit pas extrêmement élevée.

On ne saurait non plus admettre qu'il est composé d'une matière combustible capable de produire en brûlant autant

---

pas quels sont les motifs qui l'ont amené à faire ces changements. Lors même qu'on tiendrait compte de la variation qu'éprouve la distance du Soleil à la Terre, les nombres que nous venons de donner ne changeraient pas d'une manière essentielle. D'après les plus récents travaux, voici les chiffres que nous regardons comme les plus probables :

Diamètre du Soleil.	688 584 400 mètres;
Surface du Soleil.	$59\,582 \times 10^{14}$ mètres carrés;
Volume du Soleil.	$136\,757 \times 10^{22}$ mètres cubes;
Densité du Soleil.	1,46 (ce nombre est très-incertain);
Poids du Soleil	$M = 19962 \times 10^{26}$ kilogrammes.

En employant ce dernier nombre pour notre calcul, nous trouvons pour l'abaissement annuel de la température :

$$\frac{C}{M} = \frac{25914 \times 10^{26}}{19962 \times 10^{26}} = \frac{25914}{19962} = 1^{\circ},297,$$

ce qui diffère peu du nombre $1^{\circ},33$ que nous avons trouvé précédemment. M. Schellen adopte $1^{\circ},25$, mais, encore une fois, nous ne savons pourquoi il a modifié tous ces chiffres, qui, du reste, n'ont qu'une importance médiocre dans la science.

de chaleur que le charbon. Dans cette hypothèse, d'après les calculs de M. Thomson, il se serait éteint au bout de huit mille ans, même en supposant que les produits de la combustion ne dussent pas en arrêter l'activité.

Or il est incontestable que pendant toute la durée des temps historiques l'action du Soleil a été sensiblement ce qu'elle est maintenant ; elle n'a pas diminué d'une manière appréciable. Les êtres vivants, soit animaux, soit végétaux, qui se trouvent à la surface de notre globe sont depuis longtemps les mêmes, et leurs variations ont été peu considérables ; ce fait est incompatible avec un abaissement notable de la température solaire. Il est donc impossible d'admettre que la chaleur du Soleil est due à une combustion ou à la radiation d'une masse simplement incandescente.

Nous pouvons encore présenter les mêmes considérations sous une autre forme. Supposons que la température du globe solaire soit de 74920 degrés : c'est la température que M. Zöllner regarde comme probable pour la couche superficielle d'où sortent les protubérances. En 5000 ans le Soleil se refroidit de 6500 degrés ; sa température, au commencement de l'époque historique, aura donc dû être de 81410 degrés ; depuis cette époque, il aura perdu $\frac{1}{12}$ de sa chaleur sensible, perte énorme et qui ne saurait être sans influence sur la végétation. La diminution serait d'un quart, si la température initiale avait été de 27000 degrés. Si nous reculions jusqu'aux époques préhistoriques, les différences deviendraient bien plus grandes encore, et nous trouverions pour les plus anciennes des résultats de plus en plus élevés. Or, d'après les faits les plus certains de la Géologie, la Terre n'a pas dû, dans ces différentes périodes, recevoir du Soleil beaucoup plus de chaleur qu'elle n'en reçoit actuellement ; on rencontre même une époque mystérieuse, la période glaciaire, qui serait inex-

plicable si nous devions admettre que la température du Soleil était alors beaucoup plus élevée qu'elle ne l'est aujourd'hui.

Les pertes de chaleur que le Soleil éprouve sont donc loin d'être négligeables ; d'un autre côté, il est impossible d'admettre que sa température s'abaisse continuellement en raison de son rayonnement. C'est donc un problème intéressant et difficile, de savoir comment la température solaire peut demeurer renfermée dans les limites fixées par l'observation.

Pour expliquer la constance de la température solaire, on ne peut faire que deux hypothèses, celle d'une activité intérieure, et celle d'une action extérieure, complétement différente de la combustion proprement dite. W. Herschel avait supposé des courants électriques capables de produire de la lumière, comme dans nos aurores boréales ; mais nous savons maintenant que ces courants électriques eux-mêmes doivent avoir une cause ; ils ne sauraient prendre naissance spontanément ; ils doivent être produits par une force qui elle-même ne peut être créée de rien ; leur existence doit être expliquée par les lois de la Physique.

Nous allons exposer les hypothèses les plus importantes qui ont été imaginées jusqu'à présent, et nous tâcherons d'assigner la cause véritable qui produit la chaleur du Soleil et maintient sa température sensiblement constante. Nous disons *sensiblement constante,* car nous ne prétendons pas cependant que cette constance soit absolue ; même en faisant abstraction des variations périodiques constatées par les observateurs, nos moyens d'observation sont trop imparfaits, et surtout nous avons des données trop incomplètes sur les époques déjà passées pour pouvoir émettre une opinion aussi nettement tranchée. Supposons, en effet, que la température solaire soit de 6 millions de degrés, et qu'elle diminue chaque

année de 2°,8; au bout de 4000 ans la diminution serait de 11200 degrés, c'est-à-dire $\frac{1}{535}$. La radiation à la surface de la Terre, au niveau de la mer, étant au plus de 15 degrés, comme nous l'avons vu, aurait diminué dans le même rapport, c'est-à-dire de 0°,028, quantité évidemment inappréciable dans nos observations. Nous examinerons donc le phénomène en lui-même et dans ses éléments physiques en attendant que la théorie ou l'observation nous donne des renseignements plus précis.

§ III. — *Sources de chaleur extérieures au Soleil.*

Le problème dont nous cherchons la solution n'est pas nouveau. Newton déjà, considérant les pertes immenses de matière que le Soleil devait éprouver par l'émission continuelle de particules lumineuses et calorifiques, chercha une source dont l'action fût capable de compenser la radiation solaire. Il supposa que les comètes pourraient bien être destinées à cet usage; en tombant sur le Soleil, elles alimenteraient sa combustion et empêcheraient sa masse de diminuer. A cette époque, on attribuait aux comètes des masses considérables, et de plus la radiation lumineuse était considérée comme une émission de particules matérielles; l'hypothèse de Newton était donc admissible, car elle expliquait les phénomènes d'après les principes connus et les théories admises. Il n'en est plus de même aujourd'hui. Nous savons que les comètes possèdent des masses très-faibles, et nous regardons la lumière et la chaleur non comme une émission proprement dite, mais comme un mouvement vibratoire qui se communique par l'intermédiaire d'un milieu impondérable.

Ce que Newton disait de la masse du Soleil, nous pouvons

le dire de la force vive qu'il possède; sa masse ne diminue pas par la radiation, mais l'énergie que possèdent ses particules doit diminuer incessamment, s'il n'y a pas des sources abondantes pour réparer les pertes qu'il éprouve. C'est le Dr Mayer, de Heilbronn, qui a le premier formulé ce problème au point de vue mécanique, et c'est lui aussi qui en a le premier cherché la solution, en s'appuyant sur des principes qui ont complétement changé la théorie admise jusque-là. L'hypothèse de Mayer a été développée par Waterston, Thomson, Joule, etc.; nous en donnerons ici les résultats, du moins pour ce qui concerne notre sujet.

Le Dr Mayer, considérant la quantité de matière qui tombe annuellement sur la Terre, sous forme d'aérolithes ou d'étoiles filantes, et la quantité de chaleur qui pouvait être produite par la transformation de leur force vive, a été conduit à se demander si un phénomène semblable ne pourrait pas se produire dans le Soleil, et il a cherché quelle masse de matière devrait être employée à compenser ainsi la diminution de force vive produite par la radiation.

Le problème ainsi posé peut être résolu à l'aide des notions ordinaires de la Mécanique. Il est facile de calculer la vitesse que doit acquérir un corps partant des limites de l'espace ou d'une distance infinie pour tomber sur le Soleil; on peut donc connaître la force vive qu'il possédera en arrivant à la surface de cet astre. On trouve ainsi que sa vitesse est celle qu'il acquerrait en tombant d'un mouvement uniformément accéléré d'une distance égale au rayon solaire; cette vitesse est de 626 kilomètres par seconde. 1 kilogramme d'eau, en tombant ainsi sur le Soleil, produirait par son choc une quantité de chaleur capable d'élever sa propre température de 462 millions de degrés. Si la Terre venait à tomber sur le Soleil, elle produirait une quantité de chaleur égale à celle qu'il

perd en soixante-neuf ans par le rayonnement. Une masse de fer qui tomberait ainsi des profondeurs de l'espace sur la Terre développerait une quantité de chaleur suffisante pour que sa propre température s'élevât à 1327400 degrés; aussi pourrait-elle se volatiliser complétement.

Il faut remarquer, cependant, qu'en pratique les choses ne se passent pas tout à fait comme nous le supposons ici. La chaleur produite par le choc n'est pas tout entière concentrée dans le corps qui tombe; la Terre en absorbe nécessairement une partie; une autre partie est employée à échauffer l'air et à le mettre en mouvement. On comprend néanmoins comment les aérolithes deviennent incandescents par leur frottement contre l'air atmosphérique et par la compression qu'ils exercent sur lui, et comment ils arrivent à la Terre couverts d'une couche de matière fondue et vitrifiée : c'est pour la même raison qu'une partie de ces corpuscules se volatilisent complétement, et prennent l'aspect d'étoiles filantes.

On peut évaluer aussi en force dynamique la chaleur que la Terre reçoit du Soleil, et l'on trouve que la force vive qu'elle acquiert en un jour par sa chute vers le Soleil équivaut à une quantité de chaleur cent fois plus petite que celle qu'elle reçoit journellement de la radiation solaire.

Le principe de la conversion de l'énergie en chaleur constitue une des plus belles découvertes de la Science moderne; il reste à voir jusqu'à quel point on peut l'appliquer au Soleil. Que des météores tombent sur le Soleil aussi bien que sur la Terre, rien n'est plus facile à admettre ; c'est même d'autant plus probable qu'il s'agit d'une masse très-considérable et bien plus capable que la Terre de faire dévier les corps de leur direction primitive. Il est également certain que, si un corps semblable tombe à la surface du Soleil, il doit y produire trois mille fois plus de chaleur que n'en produirait en brûlant une

masse égale de charbon. On pourrait même appuyer cette théorie par des faits qui semblent la confirmer. Ainsi, en Angleterre, M. Hodginson et M. Carrington, en deux observations différentes, virent au même instant une lumière très-vive se développer en un point du Soleil très-voisin d'une tache ; ils attribuèrent ce phénomène à la chute d'un météore et à la chaleur qui en était la conséquence.

Il nous paraît plus probable que le phénomène dont ces deux savants furent témoins était une de ces éruptions violentes qui ont souvent lieu à la surface du Soleil, comme nous le savons maintenant. Cependant, comme l'explication qu'ils ont donnée n'est pas impossible, comme elle ne manque pas même d'une certaine vraisemblance, nous ne refusons pas de l'admettre.

La comète de 1843 a passé si près du Soleil qu'elle traversa son atmosphère ; elle s'embrasa et donna naissance à une vive lumière visible en plein jour auprès du disque solaire : de là cette queue prodigieuse ayant une longueur de 63 degrés. Si sa direction avait été un peu différente, elle serait tombée sur le Soleil. Nous savons maintenant que les comètes et les étoiles filantes sont des météores du même ordre.

Mais, en réalité, voici comment la question doit être posée. Ces faits, qui sont absolument possibles, existent-ils réellement ? Peut-on expliquer ainsi la constance de la température solaire ? Pour qu'il en fût ainsi, il devrait en moyenne tomber toutes les heures 1 kilogramme de matière sur chaque mètre carré. Supposons que cette substance ait une densité simplement égale à celle de l'eau, au bout d'un an, elle formerait à la surface du Soleil une couche ayant 10 mètres d'épaisseur ; cette couche serait insensible pour nous, car, en suivant cette proportion, il faudrait trente-cinq mille ans pour qu'il se produisit une augmentation d'une seconde dans le dia-

mètre solaire, augmentation qui serait passée inaperçue, vu le peu de précision des mesures les plus anciennes. Mais nous ne saurions faire le même raisonnement pour l'accroissement de la masse; dans l'intervalle de quatre mille ans elle s'accroîtrait de $\frac{1}{5000}$, et, d'après les calculs de M. Thomson, en deux mille ans le mouvement de la Terre se trouverait retardé de $\frac{1}{8}$ d'année, résultat inconciliable avec les données les plus certaines de l'Astronomie. Pour répondre à cette difficulté, on pourrait admettre que la matière qui tombe ainsi sur le Soleil se trouve à l'intérieur de l'orbite terrestre, et que c'est elle qui donne naissance à la lumière zodiacale. Mais cette hypothèse est inadmissible, car nous connaissons un grand nombre de comètes périodiques ayant une partie de leur orbite dans cette région intérieure, lesquelles devraient éprouver une grande résistance de la part de cette matière météorique; la forme de leur trajectoire et la vitesse de leur mouvement devraient se trouver complétement modifiées. La comète de Encke présente seule les vestiges de cette résistance, et l'on a déclaré qu'on pourrait même expliquer l'anomalie de son mouvement d'une autre manière. Du reste, l'observation ne signalant dans les autres corps aucune perturbation notable, il faut en conclure que ces comètes ne rencontrent dans leur mouvement aucune masse appréciable qui puisse les faire dévier de leurs orbites.

Les considérations que nous venons d'indiquer suffisent pour détruire l'hypothèse météorique; aussi cette théorie est-elle actuellement abandonnée par ses partisans et même par ses plus ardents promoteurs.

Cependant, si elle n'explique pas la persistance de la température solaire, elle ne laisse pas d'avoir quelque valeur. Un certain nombre de matières doivent nécessairement tomber sur le Soleil et y produire une quantité déterminée de cha-

leur. Appliquée à la Terre, cette même théorie pourrait donner l'explication de quelques phénomènes encore obscurs; elle pourrait, par exemple, rendre raison de l'accélération séculaire de la Lune. En effet, si la masse de la Terre s'accroît constamment par les aérolithes qui tombent à sa surface, son mouvement de rotation doit se ralentir, et celui de la Lune doit paraître s'accélérer. Pour que cette explication fût plausible, il suffirait qu'il tombât chaque année une quantité de matière capable de couvrir la surface de la Terre de l'épaisseur de $\frac{1}{10}$ de millimètre. Cette condition n'est peut-être pas impossible, puisque le nombre des étoiles filantes est très-considérable, et qu'il tombe souvent des aérolithes pesant plusieurs milliers de kilogrammes.

Dans les régions polaires, loin de tout centre d'industrie, le professeur Nordenskiöld a trouvé les neiges couvertes d'une couche noirâtre contenant du fer en quantité, et nous-mêmes en recueillîmes dans l'eau de pluie qui suivit la chute des étoiles filantes du 17 novembre 1872.

D'ailleurs la masse du Soleil n'est pas connue avec une très-grande précision. Il y a quelques années encore, on la regardait comme égale à 354936 fois la masse de la Terre; mais, comme on a reconnu la nécessité d'augmenter la parallaxe de $\frac{1}{28}$ de la valeur admise, on a dû représenter la masse par le nombre 326800.

Le mérite incontestable de l'hypothèse de Mayer, c'est d'expliquer l'origine de la chaleur solaire en la réduisant à n'être plus qu'un effet de la gravitation considérée comme une simple force mécanique, ainsi que nous allons le développer dans le paragraphe suivant.

§ IV. — *Origine de la chaleur solaire.*

Les astronomes admettent maintenant que notre système solaire résulte de la condensation d'une nébuleuse. Toute la matière qui compose actuellement le Soleil et les planètes se trouvait jadis à l'état de matière cosmique répandue dans les espaces immenses qu'embrasse le système solaire ; elle constituait donc une véritable nébuleuse analogue à celles que nous voyons encore dans plusieurs parties du ciel. Herschel, qui a étudié ces nébuleuses, a reconnu qu'elles se présentent à différents degrés de condensation ; leurs formes sont très-diverses, irrégulières, globulaires, elliptiques, annulaires ; la matière dont elles sont composées est dans un état complet de dissociation, et nous apprenons par le spectroscope qu'elles sont, pour la plupart, complétement gazeuses. Or la masse qui constitue notre système solaire, en la supposant diffusée seulement jusqu'à l'orbite de Neptune, se présenterait dans un état de raréfaction comparable à celui que produisent nos meilleures machines pneumatiques.

Si nous supposons qu'une pareille masse vienne à se condenser en se précipitant sur un point central, nous pourrons parfaitement appliquer la théorie de Mayer. Le choc réciproque des molécules mettra toute la masse en vibration thermique, et développera au centre une quantité très-considérable de chaleur. En tenant compte de la masse et de la manière dont elle a dû être primitivement répartie à différentes distances du Soleil, on a calculé que la quantité de chaleur développée de cette manière a dû élever la température à environ 240 millions de degrés ou, pour le moins, à

28 millions de degrés [1]. La température initiale du globe solaire, réduit aux dimensions qu'il possède actuellement, n'aurait pas pu être moins élevée, et l'activité thermique que possède actuellement cet astre ne serait qu'un faible résidu de l'énorme quantité de chaleur due à la seule gravitation.

Il faut bien remarquer que cette théorie ne suppose rien relativement au mode de condensation, ni à la rapidité avec laquelle elle a dû avoir lieu. Il n'est pas nécessaire, pour expliquer l'élévation de température, d'admettre que le choc s'est produit en un temps très-court. La condensation a pu être très-lente, et développer cependant la même quantité de chaleur. Aussi, en supposant que le Soleil se contracte actuellement, cette contraction, en produisant une véritable chute vers le centre, doit compenser une partie de la force vive qui est perdue par le rayonnement.

M. Maxwell Hall a pris la peine de faire ce calcul [2], et il a trouvé que, pour suppléer aux pertes dues à la radiation, il suffit que le Soleil se contracte de $39^{m},15$ par an. Il faudrait alors 18263 ans pour que le diamètre diminuât de 1 seconde.

On doit, sans doute, rapporter à la même origine la chaleur centrale des planètes, et très-probablement aussi leur énergie de translation. Cette énergie n'est que les $\frac{2}{3}$ de celle qu'elles acquerraient en tombant sur le Soleil, et celle-ci suffirait pour compenser les pertes produites en quarante-cinq mille ans par la radiation.

Telles sont les conclusions auxquelles conduit la théorie de Mayer, conclusions actuellement admises par les physiciens. La théorie météorique a été incapable de rendre compte des

---

(1) Cette différence dépend des dimensions qu'on attribue à la masse centrale après la première condensation.

(2) *Monthly Notices Astr. Soc.*, 1874, p. 237.

phénomènes qu'elle prétendait expliquer, mais elle a eu cependant un résultat très-avantageux : elle nous a fait connaître l'origine de la chaleur solaire, source universelle de la vie dans notre système planétaire. Si cette théorie est exacte, nous devons en conclure que le globe solaire ne peut être solide, car alors il lui serait impossible de se contracter librement et de se condenser assez vite pour produire ce développement énorme de chaleur; la surface ne tarderait pas à se refroidir, et la vie deviendrait impossible sur les planètes. Il n'y a que l'état fluide qui se prête à la rapidité de mouvement exigée par la théorie.

Il est difficile de se représenter avec exactitude la constitution intérieure du globe solaire. La température énorme qu'il possède porte à le croire gazeux. D'un autre côté, la gravitation est très-considérable à la surface de cet astre; elle produit une pression extrêmement grande qui tend à condenser et à liquéfier ces gaz, s'ils existent. On a calculé les pressions qui doivent s'exercer à des profondeurs relativement peu considérables. Supposons un fluide ayant la même densité que l'air qui compose notre atmosphère et formant une colonne dont la hauteur serait égale à la profondeur des taches : la pression produite par cette colonne suffirait, à la température ordinaire, pour maintenir combinés les éléments qui composent l'eau; mais, dans la masse du Soleil, la température est tellement élevée que tous les gaz s'y trouvent à l'état de dissociation, malgré la pression énorme qu'ils supportent. Cette même pression, en rapprochant les éléments, tend à augmenter la densité moyenne, et, cependant, cette densité moyenne n'est que 1,42 ou tout au plus 1,46, celle de l'eau distillée étant prise pour unité. Remarquons bien qu'il s'agit ici de la densité moyenne : les couches qui possèdent réellement cette densité doivent donc être situées à une grande profondeur, et

par conséquent les couches superficielles, loin d'être solides, ne peuvent même pas être liquides.

Il paraît probable que, à une certaine profondeur, les fluides se trouvent à cet état critique, étudié jadis par Cagniard-Latour et plus récemment par Andrews, qui sépare l'état solide de l'état liquide. On sait maintenant qu'il existe un état intermédiaire qui sert de transition entre les deux autres; dans nos expériences de cabinet, cette période critique est peu étendue, à cause des changements trop rapides de température et de la faible pression; il n'en est pas ainsi dans le Soleil, et il doit y avoir là des masses très-considérables qui se trouvent dans cet état presque inconnu pour nous.

Nous savons que, dans cette période critique, de petites variations dans l'intensité de l'une des forces antagonistes produisent des variations extraordinaires dans le volume et dans la densité des corps. N'y aurait-il pas là une explication plausible de la rapidité avec laquelle les protubérances changent de forme, et surtout de la vitesse prodigieuse avec laquelle sont lancées les masses incandescentes qui composent les protubérances? L'hydrogène semble bien difficile à liquéfier, puisque, dans les expériences de M. Cailletet, il a été comprimé jusqu'à 800 atmosphères sans qu'on ait remarqué aucune anomalie dans sa condensation; il est cependant possible que, à une grande profondeur au-dessous de la surface solaire, il soit au moins réduit à l'état limite dont nous venons de parler. La structure filiforme des protubérances et des matières éruptives rappelle une structure analogue observée par Andrews au moment où les masses fortement comprimées changent d'état. L'équilibre instable qui caractérise cet état expliquerait facilement la rapidité avec laquelle se succèdent les éruptions et les changements de forme qui se produisent en si peu de temps. Lorsque, par le refroidissement, une partie de la

masse redevient liquide, elle émet une grande quantité de chaleur qui de latente devient sensible, et peut ainsi compenser les pertes de température de la masse tout entière par la radiation. Nous pourrions trouver là une véritable source de chaleur capable de réparer pendant un certain temps les pertes que la radiation fait constamment éprouver au Soleil; mais il y a une autre source bien plus abondante que nous allons faire connaître dans le paragraphe suivant.

§ V. — *D'une autre cause de la constance de la température solaire.*

Cette nouvelle source de chaleur qui doit contribuer puissamment à maintenir constante la température du Soleil, c'est l'action chimique qui doit s'exercer entre les éléments qui constituent cet astre aussitôt que les circonstances permettent à l'affinité d'agir. Même en admettant que la température du Soleil soit aussi basse que le supposent les savants français, elle est certainement assez élevée pour maintenir les différents éléments matériels dans cet état que les chimistes désignent par le mot *dissociation*, état où ils possèdent une grande quantité d'énergie qui se transforme en chaleur au moment de la combinaison. Les chimistes ont démontré que, à des températures suffisamment élevées, les corps simples, malgré l'affinité qui tend à les réunir, peuvent rester en présence sans se combiner : on dit alors qu'ils sont *dissociés*. Lorsque la température s'abaisse, la combinaison peut avoir lieu, mais elle est accompagnée d'un dégagement considérable de chaleur. Arrêtons-nous un instant sur ces belles découvertes, et voyons le parti que nous pouvons en tirer pour le sujet qui nous occupe.

Les travaux de M. H. Sainte-Claire Deville nous ont appris que les flammes contiennent une certaine quantité de gaz qui, grâce à la chaleur, échappent à toute combinaison ; le savant chimiste a réussi, par des procédés très-ingénieux, à isoler ces gaz de manière à mesurer leurs volumes. Il a ainsi démontré que, dans la combustion du mélange d'oxygène et d'hydrogène, une moitié du gaz est maintenue à l'état de dissociation par la grande quantité de chaleur que l'autre moitié produit en brûlant. Il y a un parallélisme évident entre ces phénomènes et ceux qui se manifestent dans la condensation des vapeurs. La partie de la masse gazeuse qui se condense développe une quantité considérable de chaleur qui était latente et qui redevient sensible; cette chaleur sert à maintenir à une température suffisamment élevée la partie qui échappe à la condensation. C'est ainsi qu'une masse de vapeur d'eau, en se condensant à l'état liquide, perd une quantité de chaleur égale à 540 calories; pour se solidifier, elle en perdra de nouveau 79; de sorte que la vapeur, pour passer à l'état liquide, pourra émettre 540 unités de chaleur sans que sa température s'abaisse, malgré les pertes de calorique. Il en est de même pour une masse liquide qui se solidifie. Il est évident que le refroidissement est singulièrement ralenti par ses propriétés.

Il y a la plus grande analogie entre les faits que nous venons de rappeler et ceux qui accompagnent les combinaisons chimiques. A l'état de dissociation, les gaz contiennent une certaine quantité de chaleur latente ([1]), qui devient sensible au moment où la combinaison s'effectue. Toute la chaleur qui

---

([1]) Nous employons ce terme dans le sens usuel. La Théorie mécanique de la chaleur en a déjà précisé la signification : c'est une puissance disponible qui devient actuelle.

disparaît dans la dissociation reparaît dans la combinaison, sans perte aucune, et, d'après les dernières déterminations, cette quantité de chaleur est égale, pour l'eau, à 3830 calories. Aussi, en supposant que les deux gaz se combinent complétement, sans qu'aucune partie reste dissociée, il en résulterait une quantité de chaleur égale à 3830 calories. Une belle expérience de Physique nous donne un exemple très-remarquable de cette absorption de chaleur dans les décompositions. On plonge dans un verre d'eau deux fils de platine très-minces que l'on fait communiquer avec les pôles d'une pile puissante de 30 à 50 couples de Bunsen de grande dimension. Si les fils plongent à une faible profondeur, l'eau s'échauffe rapidement sans se décomposer; mais, si on les enfonce davantage, la décomposition commence, et la température cesse de s'élever.

Supposons qu'une masse de gaz dissociés passe à l'état de combinaison, toute la chaleur latente de dissociation deviendra sensible, et par conséquent le refroidissement sera beaucoup plus lent. Admettons que le rayonnement fasse perdre au corps une quantité de chaleur capable d'en refroidir la masse en un an de 1 degré ; si, en vertu de ce refroidissement, la combinaison commence dans une portion de la masse et s'étend progressivement à la masse tout entière, comme cette combinaison fournit 3830 calories, ce même refroidissement de 1 degré ne se produira qu'en 3830 ans, ou 40 siècles environ.

On objectera sans doute que, le Soleil n'étant pas uniquement composé d'oxygène et d'hydrogène, le calcul précédent n'a aucune application; mais d'abord les observations spectrales prouvent que l'hydrogène se trouve en très-grande quantité dans le Soleil. De plus, il y a des substances pour lesquelles la dissociation demande une température tellement élevée, que nous ne saurions la définir. Dans tous les cas, il

n'est pas nécessaire de connaître exactement la chaleur latente de dissociation de tous les corps pour comprendre le rôle important qu'elle joue dans le phénomène que nous voulons expliquer.

Supposons que le Soleil ait une chaleur de dissociation moyenne égale à celle de l'eau, supposons de plus que, pour se refroidir de T^0 à T'^0, il lui faille un temps θ dans le cas où il ne serait pas à l'état de dissociation; ce même abaissement de température ne pourra avoir lieu que dans un temps égal à 3830 θ, environ 4000 fois plus. Il est donc impossible que nous constations les variations, car elles sont beaucoup moins considérables que celles qui se produisent aux époques de maxima et de minima des taches, et celles-là échappent à nos moyens d'observation.

Nous pourrions encore pousser plus loin cette théorie. Les chimistes nous enseignent que les poids atomiques des corps simples sont des multiples de poids atomiques de l'hydrogène; ils ont trouvé de plus qu'il y a une relation très-étroite entre ces poids atomiques et les chaleurs spécifiques des différentes substances. Plusieurs philosophes en ont conclu que chacun des corps que nous considérons comme simples peut être envisagé comme composé d'un certain nombre d'atomes d'hydrogène. Si cette hypothèse est exacte, il est possible qu'à la température à laquelle se trouve le globe solaire, la dissociation s'étende également à ces éléments premiers, à cet *Urstoff* des philosophes allemands. Il y aurait donc là une nouvelle source de calorique, car toute dissociation suppose une quantité considérable de chaleur latente qui doit devenir sensible au moment de la combinaison. Cette conjecture ne doit pas paraître invraisemblable, surtout si nous réfléchissons à la mystérieuse existence de ce gaz très-léger qui produit la raie 1474 de la couronne, à cet autre corps, dont nous

avons parlé tant de fois, qui donne naissance à la raie D_3, et enfin à tant d'autres substances auxquelles on doit attribuer des raies nombreuses qui se trouvent dans le spectre solaire et dont l'origine nous est inconnue. Nous ne voulons cependant pas donner à ces hypothèses plus de valeur qu'elles n'en ont réellement aux yeux des savants, qui sont loin de les regarder comme incontestables; nous nous contentons de les indiquer, pour donner un exemple de la richesse et de l'inépuisable fécondité des ressources que la nature peut avoir à sa disposition.

On voit donc que, malgré des radiations continuelles et abondantes, la température du Soleil peut, sinon demeurer absolument constante, du moins varier assez lentement pour qu'il soit impossible de constater son abaissement, si ce n'est après un intervalle de plusieurs milliers d'années. Après un laps de temps beaucoup plus considérable, après plusieurs millions de siècles par exemple, le Soleil sera considérablement refroidi; il viendra sans doute une époque où il n'aura plus la force d'entretenir la vie à la surface des planètes. L'économie actuelle de la création consiste en ce que des centres d'énergie plus puissants agissent sur les astres qui les entourent de manière à donner aux êtres vivants ce qui est nécessaire à leur développement. Cette énergie n'est pas inépuisable; elle se dissipe progressivement et tend à produire un ordre de choses différent. Il est cependant possible que l'Auteur de la nature ait disposé les choses dès le commencement de manière à réparer l'activité éteinte du Soleil par quelque phénomène extraordinaire, par exemple par la chute d'une nébuleuse; mais ce sont là des questions oiseuses auxquelles nous aurions tort de nous arrêter. L'ordre qui règne actuellement dans notre système solaire doit-il y régner indéfiniment? L'état actuel n'a pas toujours duré, la Géologie nous

l'enseigne, et, puisqu'il a dû avoir un commencement, pourquoi n'aurait-il pas une fin?

Avant de terminer ce Chapitre, nous voulons résoudre une objection qui peut au premier abord paraître embarrassante, mais qui n'est pas sérieuse. Le Soleil est un centre puissant d'attraction : dès lors, comment admettre qu'il se trouve à l'état gazeux? L'attraction est proportionnelle aux masses; comment une masse gazeuse ayant un volume limité pourrait-elle produire des effets aussi considérables? Pour répondre à cette objection, remarquons que l'état gazeux n'est pas incompatible avec la gravitation, témoin l'atmosphère terrestre qui exerce une attraction considérable. Cet état n'est pas non plus incompatible avec une assez grande densité : en comprimant un gaz pour diminuer son volume et augmenter son poids spécifique, on finit tôt ou tard par le liquéfier; mais, pour empêcher cette liquéfaction, il suffit d'élever la température. Or ces deux circonstances se trouvent réunies dans le Soleil : la température y est très-élevée, et la pression, au moins dans les couches intérieures, y devient énorme. D'ailleurs, la densité moyenne du Soleil, rapportée à celle de l'eau, est seulement de 1,42; elle n'est donc pas très-considérable, surtout si nous remarquons que, dans cette masse, il y a beaucoup de métaux dont le poids atomique est très-élevé par rapport aux gaz proprement dits. On voit donc que la densité moyenne du Soleil est assez faible pour être compatible avec l'état gazeux; en même temps, elle est assez considérable pour expliquer l'attraction puissante que cet astre exerce sur les planètes qui l'entourent.

De tout ce que nous avons exposé dans ce Chapitre, nous pouvons tirer les conclusions suivantes, qui en seront le résumé :

1° La température du Soleil s'élève à plusieurs millions de

degrés, mais il nous est impossible de la déterminer avec précision.

2° Cette température est probablement le résultat de la gravitation ; elle aurait été produite par la chute de la matière qui constituait la nébuleuse primitive et qui compose actuellement le Soleil et les planètes.

3° A cette époque de formation, la température devait être beaucoup plus élevée qu'elle ne l'est maintenant : le Soleil est donc dans une période de refroidissement.

4° Quoique le Soleil perde continuellement des quantités énormes de chaleur, l'abaissement de température est extrêmement faible ; il ne dépasse pas 1 degré en quatre mille ans. Ce résultat est dû en partie à sa condensation et en partie à l'état de dissociation dans lequel se trouve la matière sous l'action de la chaleur.

5° Quoique la température du Soleil ne soit pas absolument invariable, ses variations séculaires sont cependant plus faibles que les fluctuations à courte période dont nous constatons l'existence sans pouvoir les évaluer d'une manière complète : aussi devons-nous penser que notre planète restera habitable pendant une longue suite de siècles.

CHAPITRE III.

DE QUELQUES PHÉNOMÈNES QUI DÉPENDENT DE LA CONSTITUTION PHYSIQUE DU SOLEIL.

§ I. — *Circulation de la masse fluide qui compose le Soleil.*

S'il est vrai que le Soleil est encore actuellement dans un état progressif de condensation et qu'une partie au moins de la matière qui le compose se trouve à l'état gazeux, on devra constater, dans le mouvement de ses différentes parties, des phénomènes résultant de cette fluidité totale ou partielle, phénomènes qui seront incompatibles avec l'hypothèse d'une masse solide et rigide.

D'abord, si la masse est à l'état de fluide élastique, il faut en conclure que les différentes couches concentriques ont une assez grande liberté de mouvements et qu'elles ne dépendent pas absolument les unes des autres, comme il arrive dans la rotation d'un corps solide dont toutes les molécules doivent avoir la même vitesse angulaire. Si la condensation est progressive, il devra arriver, en vertu de la loi des aires, que les couches intérieures auront une vitesse angulaire plus grande que celle des couches superficielles : c'est ainsi qu'on explique la formation et l'accélération progressive des anneaux qui, en se brisant, ont donné naissance aux planètes. Il est vrai que le frottement entre les différentes parties qui constituent le globe solaire tend, en ralentissant le mouvement des couches intérieures et en accélérant celui des couches plus éloignées

du centre, à rendre la vitesse angulaire uniforme dans toute la masse; mais, cette réaction étant successive, tandis que la cause que nous venons de signaler est continue et persistante, il en résultera une tendance continuelle à l'égalité de vitesse, tendance qui ne sera jamais réalisée. Nous avons déjà constaté, dans l'étude des taches, des phénomènes qui font soupçonner cette vitesse plus considérable à l'intérieur : tels sont, par exemple, les sauts en avant qui se produisent si souvent aux époques de recrudescence dans l'activité solaire. Cette différence de vitesse doit surtout devenir sensible dans les éruptions, et les taches produites par les masses qui arrivent d'une grande profondeur doivent avoir une vitesse plus grande que celle de la couche superficielle qui les entoure.

Ce principe renferme l'explication d'un phénomène plus important dont on a cherché inutilement l'explication. L'étude des taches nous a prouvé que la vitesse angulaire de rotation est plus grande à l'équateur que sur les parallèles; d'après la loi de M. Faye, fondée sur les observations de Carrington, la différence de vitesse angulaire serait proportionnelle au carré du sinus de la latitude : $K \sin^2 \lambda$. Ce fait s'explique facilement par la contraction de la masse solaire. En vertu du refroidissement, le rayon du cercle décrit par chaque point doit diminuer de longueur, et la vitesse angulaire doit augmenter en proportion [1]. L'aire du cercle équatorial étant πR^2, celle du parallèle situé à la latitude λ sera $\pi R^2 \cos^2 \lambda$, et les accroissements de vitesse dus à la contraction seront : à l'équateur $2K\pi R\,dR$; à la latitude λ, $2K\pi R\,dR \cos^2 \lambda$, car la latitude du

---

(1) Un secteur du rayon r, comprenant un angle α, a pour surface $\frac{1}{2} r^2 \alpha$. Si le rayon diminue et devient r', la surface devient $\frac{1}{2} r'^2 \alpha'$. Comme les aires décrites dans des temps égaux doivent être égales, on aura $\frac{1}{2} r^2 \alpha = \frac{1}{2} r'^2 \alpha$, $\alpha' = \alpha \frac{r^2}{r'^2}$, et comme $r^2 > r'^2$, on aura $\alpha' > \alpha$.

point pendant cette contraction reste constante. Prenons leur différence; nous trouverons

$$2 K \pi R dR (1 - \cos^2 \lambda) = 2 K \pi R dR \sin^2 \lambda,$$

c'est-à-dire que la différence des accroissements de vitesse angulaire sera proportionnelle au carré du sinus de la latitude : c'est la loi de M. Faye. Sans doute, cette valeur théorique de l'accélération devra subir de grandes modifications, à cause des réactions nombreuses qui se produisent dans la circulation générale; mais ici encore la cause est persistante, et l'effet produit sera en définitive un accroissement de vitesse à l'équateur. Si la force accélératrice agissait seule, l'accélération serait constante, la vitesse s'accroîtrait constamment et indéfiniment. C'est le frottement et l'ensemble des réactions que les molécules exercent les unes sur les autres qui met une limite à cette accélération; il s'établit entre ces forces antagonistes un équilibre dynamique qui produit comme résultat définitif un mouvement uniforme, plus rapide à l'équateur que dans les latitudes élevées.

L'observation a encore prouvé que la température du Soleil est plus élevée à l'équateur qu'aux pôles; cet excès de chaleur peut bien tenir à la même cause. Cette distribution inégale de la chaleur doit produire un mouvement continu, une véritable circulation des gaz, dans l'atmosphère supérieure de l'équateur vers les pôles, et des pôles vers l'équateur dans l'intérieur du globe solaire. Cette circulation se fait surtout sentir dans les hautes régions de l'atmosphère, au-dessus de la chromosphère; on la constate par la direction systématique des protubérances, dont les parties élevées sont régulièrement inclinées vers les pôles. Il n'est pas encore prouvé qu'il y ait une circulation semblable dans la photosphère; car on n'a pas trouvé de loi constante pour le mouve-

ment propre des taches en latitude, tandis qu'il est parfaitement démontré qu'elles ont un mouvement en longitude qui est maximum à l'équateur. Au Ve Chapitre du Livre précédent (p. 143), nous avons déjà signalé des mouvements généraux dans les zones d'activité qui peuvent avoir des rapports avec cette circulation.

Si la vitesse du refroidissement n'est pas constante, la vitesse du courant équatorial sera variable, et l'on pourra attribuer à ces variations les changements périodiques observés dans la durée de la rotation solaire : c'est précisément ce que M. Spörer vient de découvrir, car il nous écrit qu'il a constaté des variations périodiques dans la durée de la rotation. Cette rotation est donc très-complexe, et il nous est impossible d'en déterminer la durée d'une manière précise d'après les observations que nous faisons à la surface du Soleil. Il faudrait recourir à des phénomènes d'un autre ordre, par exemple aux influences magnétiques. Or nous savons que l'étude de ces phénomènes nous conduirait à admettre une durée de rotation plus courte que celle qui résulte du mouvement des taches équatoriales.

§ II. — *Constitution de la surface visible du Soleil.*

L'observation optique nous apprend que la surface visible du Soleil présente un aspect marbré, et qu'elle est recouverte de granulations innombrables. L'observation des éclipses prouve que, au-dessus de cette surface visible, il existe une couche de vapeurs brillantes ayant une épaisseur très-appréciable, et que, au-dessus de ces vapeurs, il y a une atmosphère diffuse. Si la masse brillante elle-même est gazeuse, si par conséquent elle jouit d'un certain degré de transparence, on est

amené à se demander : qu'est-ce qu'on appelle la surface du Soleil ?

Voici ce que nous croyons pouvoir répondre à cette question : nous appelons *surface* du Soleil la couche qui, pour un observateur placé sur la Terre, sépare la masse du Soleil en deux parties, l'une plus extérieure qui émet une lumière très-faible et est sensiblement transparente, l'autre plus rapprochée du centre et qui est très-vive, opaque et brillante. Cette couche n'est pas une surface géométrique ; elle a nécessairement une certaine épaisseur : il y a une limite inférieure où la matière cesse absolument d'être transparente, une limite supérieure où elle cesse d'être lumineuse ; entre ces deux points, sa transparence va en croissant en même temps que son éclat lumineux diminue progressivement. L'analyse spectrale nous apprend que, dans cette couche, les éléments sont dans un état de diffusion extrême : à l'intérieur, les raies de Fraunhofer sont nettement tranchées ; à l'extérieur, on ne les retrouvera plus qu'à cause de la lumière diffusée par notre atmosphère et par celle du Soleil lui-même. Un grand nombre de raies disparaissent dans l'intervalle qui sépare ces couches, d'autres deviennent moins intenses, quelques-unes se renversent même complétement.

Les éclipses nous apprennent que la masse visible du Soleil ne se termine pas encore là. Au-dessus de cette couche dont l'éclat lumineux va en diminuant progressivement, il en existe une autre qui a échappé ordinairement à nos observations, car son éclat est moins grand que celui de la lumière diffuse que nous recevons de notre atmosphère éclairée par le Soleil. Le niveau de cette couche ne paraît pas absolument constant, ce qui revient à dire que le diamètre du globe solaire varie avec le temps : cette variation est très-faible, mais elle est sensible.

Si le Soleil est gazeux dans toute sa masse, on peut se demander pourquoi il n'est pas absolument transparent; pourquoi une partie est visible et une autre invisible. Cette question demande quelques explications qui achèveront de faire comprendre ce que nous venons de dire.

Quelques auteurs admettent comme un axiome que tous les gaz sont transparents, quelles que soient leur température et leur pression : cette assertion, loin d'être prouvée, doit être regardée comme absolument fausse dans sa généralité. Nous avons déjà fait remarquer que l'hydrogène qui compose les protubérances n'est pas rigoureusement transparent, sans quoi, lorsque deux jets incandescents passent l'un devant l'autre, ils devraient être plus brillants au point d'intersection; il ne se produit rien de semblable, et c'est de là que dérive cette structure plate des protubérances, qui ne produisent sur l'œil de l'observateur aucun effet de relief. Une substance à l'état de gaz incandescent peut donc ne pas posséder une transparence parfaite.

Remarquons, en outre, que le Soleil doit être principalement composé de vapeurs métalliques; or ces vapeurs sont très-peu transparentes, car elles produisent des absorptions très-grandes, qui expliquent précisément l'origine des raies de Fraunhofer. Du reste, l'existence de ces raies prouve bien que les vapeurs qui les produisent sont réellement à l'état de gaz proprement dit et non à l'état de brouillard.

Ces réflexions étant bien comprises, répondons d'une manière plus précise à la question que nous avons posée sur la surface du Soleil. Cette surface nous paraît déterminée par plusieurs circonstances : 1° par la couche de niveau des vapeurs métalliques les plus lourdes; M. Cailletet a prouvé que, sous une forte pression, les raies des vapeurs métalliques deviennent diffuses : si la couche devient très-dense, les raies

se transforment en bandes très-larges, comme nous l'avons vu pour le sodium et le thallium; sous une pression convenable, leurs spectres deviendraient sans doute continus comme celui de l'hydrogène, et alors on peut bien penser que les vapeurs elles-mêmes cesseraient d'être transparentes; 2° elle est déterminée par la température à laquelle ces vapeurs plus lourdes se condensent et passent à l'état de brouillard. Nous avons déjà dit qu'il y a deux manières de concevoir l'état physique de la photosphère : elle peut être composée de gaz soumis à une pression assez forte pour qu'ils émettent une lumière très-brillante ayant un spectre continu, ou bien de vapeurs métalliques condensées à l'état de brouillard incandescent. Jusqu'à présent, nous n'avons aucune raison décisive qui nous fasse adopter de préférence l'une de ces deux hypothèses. Cependant, les variations du diamètre solaire, qui nous paraissent incontestables, s'expliqueraient plus facilement dans la théorie de Wilson, qui attribue l'éclat de la lumière solaire à des particules solides et incandescentes flottant dans une atmosphère gazeuse. Il suffirait alors d'une élévation locale de température ou d'un accroissement d'activité pour volatiliser une partie de ces particules solides : c'est ainsi que, dans les époques de grande activité, et dans les points où cette activité se manifeste particulièrement, la surface visible qui limite extérieurement le Soleil se trouverait abaissée.

La solution définitive de cette question dépend des propriétés que possèdent les vapeurs métalliques lorsqu'elles sont à une température très-élevée et soumises à une forte pression; nous devons attendre que les physiciens aient fait à ce sujet des expériences plus précises.

§ III. — *Variations des enveloppes solaires.*

Nous avons reconnu que la surface du Soleil est gazeuse et nous l'avons comparée à la surface de niveau d'une masse de nuages ou d'un gaz devenu incandescent sous une forte pression. Si cette manière de voir est exacte, nous devons en conclure qu'une surface ainsi déterminée peut bien se déplacer, et que, par conséquent, le globe solaire, limité par une couche variable, doit aussi avoir un diamètre variable. Les astronomes avaient bien constaté que ce diamètre ne paraissait pas avoir toujours la même grandeur; mais on attribuait les différences à des erreurs accidentelles et aux équations personnelles des observateurs.

Nous avons déjà dit quels ont été à cet égard les résultats des recherches du P. Rosa, qui rendent probable l'existence d'une variation, soit à courte période, soit à période plus longue. Nous ajouterons seulement ici que ces recherches n'ont pas été abandonnée au Collége romain, et qu'un jeune astronome, M. Spée, ayant poursuivi ces recherches, a constaté que, dans l'époque actuelle de calme (1876), le Soleil présente un diamètre d'une constance presque absolue, s'accordant avec la valeur qui lui est assignée à Greenwich. Les différences d'un jour à l'autre n'affectent que les centièmes de seconde en temps, tandis que dans les époques d'activité elles atteignaient les dixièmes, comme nous l'avons déjà dit.

Il est maintenant très-intéressant de comparer ce résultat à celui qui a été obtenu à une époque de grande activité. Le P. Rosa est parvenu à montrer une certaine régularité dans ces variations, qui paraissent si irrégulières, en construisant la courbe des observations pour l'année 1871-1872, qui est

une époque de maximum. Il prit pour abscisse le degré de latitude héliographique auquel correspond chaque jour le diamètre solaire qu'on observe par la méthode des passages, et pour ordonnée la valeur correspondante de ce même diamètre. Afin de diminuer les erreurs accidentelles, il groupa trois par trois les valeurs trouvées pour le diamètre, et il en prit la moyenne. Cette courbe une fois construite, il fut facile de constater que le diamètre solaire présente un minimum correspondant à 21 degrés de latitude, c'est-à-dire à la région où l'activité est plus considérable. Ce minimum se reproduit dans les quatre parties de la courbe qui correspondent aux quatre saisons : elles se coupent deux à deux, et leurs intersections sont très-voisines, tandis que partout ailleurs elles sont séparées les unes des autres par des intervalles assez grands. Voici, d'après les recherches du P. Rosa, les valeurs moyennes du diamètre solaire qui correspondaient aux différentes latitudes.

	Diam.	Moy.		Diam.	Moy.
Lat. 0....	32′.4″,31		Lat. 15...	32′.2″,54	
» 1....	32.3,30	32′3″,84	» 16...	32.2,57	32′.2″,66
» 2....	32.3,90		» 17...	32.2,88	
» 3....	32.3,82		» 18...	32.3,16	
» 4....	32.3,99	32.3,62	» 19...	32.3,33	32.2,87
» 5....	32.3,12		» 20...	32.2,11	
» 6....	32.3,98		» 21...	32.1,84	
» 7....	32.4,00	32.3,75	» 22...	32.2,70	32.2,18
» 8....	32.3,28		» 23...	32.1,99	
» 9....	32.3,47		» 24...	32.3,19	
» 10....		32.2,86	» 25...	32.2,86	32.2,86
» 11....	32.2,25		» 26...	32.2,52	
» 12....	32.2.63				
» 13....	32.2,89	32.3,30			
» 14....	32.4,38				

Selon M. Wolf, de Zurich, le diamètre serait maximum à l'époque où les taches sont plus nombreuses.

Nous sommes loin d'attribuer à ces conclusions une valeur absolue; mais, comme les observations du P. Rosa sont confirmées par les observations anciennes et par l'étude attentive qu'il en a faite, nous les croyons assez remarquables pour les signaler à l'attention des astronomes.

§ IV. — *Résumé.*

Nous nous sommes occupés jusqu'à présent de la structure du Soleil, de sa constitution intérieure et de son état physique. Avant d'arriver à ce qui concerne son activité extérieure, nous allons jeter un coup d'œil d'ensemble sur la longue suite de faits que nous venons d'exposer, et nous résumerons en quelques mots la doctrine qui en est la conséquence :

1° Le Soleil est composé d'une masse fluide incandescente ayant une température très-élevée; les métaux et plusieurs autres substances, les unes connues, les autres inconnues, se trouvent à sa surface à l'état de vapeurs permanentes.

2° La limite du globe solaire est pour nous le lieu des points où ces vapeurs deviennent incandescentes, soit par condensation sous forme de brouillard, soit par l'effet d'une forte pression et d'une température élevée. Cette couche terminale porte le nom de *photosphère;* elle nous envoie des rayons lumineux de toute nature qui devraient donner un spectre continu.

3° Au-dessus de la couche photosphérique se trouve une *atmosphère* dont la nature est très-complexe. A la base se trouvent des vapeurs métalliques, dont la température est relativement peu élevée. Ces vapeurs absorbent un grand

nombre de rayons et produisent ainsi les raies de Fraunhofer; elles sont mélangées avec une quantité très-grande d'hydrogène qui forme à lui seul une couche visible, appelée *chromosphère,* dont la hauteur est habituellement de 10 à 15 secondes. De cette disposition, nous devons conclure que les gaz sont simplement mélangés, et qu'ils ont une certaine tendance à se superposer par ordre de densité.

4° La chromosphère est la dernière couche qui soit constamment visible dans le spectroscope. Au-dessus d'elle se trouve l'hydrogène mélangé avec deux autres substances qui produisent la raie jaune D_3 et la raie 1474 K; il est probable que ce mélange contient encore plusieurs autres gaz. Ces substances, extrêmement raréfiées et diffuses, forment une enveloppe qui n'est visible que pendant les éclipses totales : c'est ce qui produit la *couronne.* Il est probable que cette atmosphère se prolonge de manière à donner naissance à la lumière zodiacâle.

5° La masse intérieure du Soleil est agitée par des mouvements violents qui ont pour effet de soulever à des hauteurs considérables la photosphère et la chromosphère en produisant de véritables éruptions. Les observations spectrales nous permettent de constater la présence des substances éruptives à une hauteur de 8 minutes, c'est-à-dire 340 000 kilomètres; pendant les éclipses, on a vu des protubérances dont la hauteur atteignait 700 000 kilomètres. Pendant les éruptions, la matière chromosphérique est soulevée à des hauteurs énormes, comparables à celles des panaches brillants qu'on observe pendant les éclipses et dont la longueur dépasse le tiers du diamètre solaire. Ces mouvements sont tellement violents qu'une partie de la matière éruptive pourrait bien être lancée en dehors de l'atmosphère solaire de manière à se répandre dans les espaces planétaires.

6° Dans ces éruptions, les masses les plus lourdes, composées surtout de vapeurs métalliques, retombent vers le Soleil et se déposent sur la photosphère en nappes obscures et absorbantes; par leur poids, elles produisent dans la matière photosphérique des cavités qui se trouvent ainsi remplies de matières obscures : c'est ce que nous appelons des *taches*. L'analyse spectrale nous fait constater dans ces régions une absorption élective très-énergique, et la nature des raies modifiées nous montre que dans les taches et dans les éruptions on trouve les mêmes substances chimiques. La matière brillante de la photosphère envahit ces cavités et dissout la masse obscure : c'est ainsi que les taches finissent par disparaître.

7° Les régions de la surface solaire soulevées par les forces éruptives au-dessus du niveau général, ou rendues plus brillantes par une activité thermique plus considérable, constituent ce qu'on appelle les *facules*. Leur élévation au-dessus du niveau général de la photosphère peut souvent être constatée par les observations directes; les observations spectrales la rendent encore bien plus sensible. Lorsque les conditions sont favorables, on y reconnaît ordinairement la présence des vapeurs de sodium, de magnésium, de fer et de plusieurs autres substances.

8° Ces agitations intérieures se font surtout sentir dans la région des taches, où l'activité est plus considérable. Cette zone, où l'activité solaire se traduit par des éruptions plus violentes, s'étend de part et d'autre de l'équateur à une latitude d'environ 40 degrés. Dans les latitudes plus élevées, les forces éruptives ne font que soulever la chromosphère; les vapeurs métalliques ne sont jamais lancées à une grande hauteur, on ne les voit qu'avec peine, et seulement dans les régions les plus basses de l'atmosphère, tout près du bord du disque.

9° Les régions des taches se font remarquer par la violence des éruptions qui s'y produisent, par l'élévation et la vivacité des jets, par le grand nombre de vapeurs métalliques qui entrent dans leur composition, ce qui prouve une température très-élevée et une puissance considérable dans la cause qui produit ces phénomènes. Les deux zones sont séparées par une région où l'activité est moins considérable. Vers les pôles, il y a deux zones d'activité intermittente.

10° Les taches, qui, depuis si longtemps, attirent l'attention des observateurs, ne sont donc que des phénomènes secondaires produits par les éruptions ; elles en dépendent pour leur formation et pour leurs différentes phases. Au moment de leur dissolution, elles sont le siége de phénomènes secondaires qui résultent du mélange des masses environnantes ayant des températures très-différentes : on ne voit alors que des flammes très-basses ou de faibles agitations de la chromosphère ; quelquefois même, quoique très-rarement, il y a absence complète de flamme et d'agitation de la matière chromosphérique.

11° La surface troublée par ces agitations est bien plus grande que celle qui est occupée par les taches. La formation d'une tache ne serait pas la conséquence nécessaire d'une éruption si les matières éruptives n'avaient pas un pouvoir absorbant très-considérable, surtout le sodium ; mais ces matières sont ordinairement empruntées à la photosphère ; ce sont donc des vapeurs métalliques qui, une fois refroidies, se déposent à la surface en creusant des cavités d'autant plus profondes qu'elles sont plus lourdes.

12° Près des pôles, l'activité est moins grande, la chromosphère est seule agitée et soulevée ; il en résulte des protubérances qui, ne contenant que de l'hydrogène, ne peuvent fournir les vapeurs absorbantes nécessaires à la formation des

taches. Toutes les protubérances ne sont donc pas de véritables éruptions : la différence consiste essentiellement dans la présence ou dans l'absence des vapeurs métalliques; même sans l'aide du spectroscope et l'observation des raies individuelles, on peut distinguer ces deux ordres de phénomènes par leur aspect extérieur, par les différences qui existent dans l'élévation et la vivacité des jets incandescents. Près des pôles, les protubérances se réduisent quelquefois à de simples diffusions de la matière chromosphérique semblables à celles que nous observons dans nos nuages. La granulation de la surface solaire est produite par ces innombrables petits jets incandescents qu'on retrouve sur le contour du disque sous forme de petites flammes, de poils ou de gerbes.

13° L'activité du Soleil présente des variations périodiques très-singulières; la durée moyenne de chaque période est probablement de onze ans et un tiers. Pendant cet intervalle, il se produit d'autres variations dont l'étendue est moins grande et la période plus courte; leur origine est encore peu connue, mais elles paraissent dépendre de l'action des planètes. Ces variations de l'activité solaire n'ont été étudiées jusqu'à présent que relativement au nombre des taches qui en sont la conséquence; mais les observations spectrales faites ces dernières années nous apprennent qu'il y a des variations périodiques très-compliquées dans l'étendue qu'occupent les protubérances, soit en longitude, soit en latitude, qui marchent d'accord avec les taches.

14° L'état intérieur du Soleil nous est complétement inconnu; cependant tout nous porte à croire qu'il est à l'état gazeux jusqu'à une profondeur très-grande. A l'intérieur, il est sans doute à cet état critique qui sépare les gaz des liquides; les forces antagonistes sont alors en équilibre très-peu stable, ce qui expliquerait l'abondance et l'énergie des éruptions.

15° La quantité énorme de chaleur emmagasinée dans le Soleil n'est qu'une faible partie de celle qui s'est développée pendant la formation de cet astre. La source principale de cette chaleur est la force de gravité, dont le travail a développé l'immense quantité de force vive concentrée dans ce vaste foyer; la condensation progressive du Soleil continue encore à produire de la chaleur et contribue ainsi à maintenir constante la température de l'astre.

16° La radiation fait perdre au Soleil des quantités immenses de chaleur; mais il y a des sources de compensation, non-seulement dans l'action de la gravité, ainsi que nous venons de le dire, mais surtout dans les changements d'état qu'éprouve la matière solaire : il suffit qu'une faible partie de cette matière passe de l'état de dissociation à celui de combinaison pour émettre une quantité de chaleur capable de compenser abondamment les pertes quotidiennes.

17° Nous devons donc considérer le Soleil comme un corps qui perd de la chaleur; sa température demeure cependant sensiblement constante pendant des périodes immenses, bien plus longues que celles qui peuvent avoir quelque intérêt pour l'humanité. Supposons la matière solaire à un état de diffusion assez grand pour qu'elle occupe tout l'espace planétaire jusqu'à l'orbite de Neptune; supposons qu'une force quelconque la condense subitement et sans perte de force vive de manière à lui faire occuper son volume actuel; cette condensation produirait une quantité de chaleur capable de volatiliser de nouveau la masse tout entière : nous pouvons juger par là des énormes pertes d'énergie thermique que le Soleil a dû éprouver avant de parvenir à l'état sous lequel nous le voyons aujourd'hui.

18° De ces pertes continuelles résulte une circulation générale de la masse solaire. Cette circulation se manifeste par la

direction des protubérances régulièrement inclinées vers les pôles et par des différences sensibles dans la vitesse de rotation des diverses parties : le maximum a lieu à l'équateur et la vitesse va en diminuant dans les latitudes plus élevées. Il est impossible de révoquer en doute l'existence de cette circulation, quoiqu'elle n'ait pas encore été complétement étudiée ni expliquée; sa régularité est souvent troublée par les actions qui produisent les taches et les protubérances.

19° Rien ne prouve que le Soleil doive demeurer indéfiniment dans l'état où nous le voyons; mais, si nous tenons compte de l'immense quantité de matière qui le compose, nous pouvons être certains que les influences qu'il exerce sur son cortége de planètes et de satellites continueront à s'exercer encore pendant des millions et des millions de siècles sans aucun changement appréciable.

Nous avons parlé jusqu'à présent de la nature intime de l'astre mystérieux qui nous éclaire; ce que nous avons découvert est sans doute bien peu de chose, et encore nos connaissances sont mélangées de bien des incertitudes. Cependant, si nous considérons les progrès rapides que la Science a faits dans ces derniers temps, nous ne pouvons que nous féliciter de ces immenses travaux et vivre dans l'espérance que les savants, qui travaillent avec tant de courage et de persévérance, ne tarderont pas à nous faire connaître d'autres merveilles.

LIVRE VII.

ACTIVITÉ EXTÉRIEURE DU SOLEIL.

CHAPITRE PREMIER.

LES RADIATIONS.

Jusqu'à présent, nous avons considéré le Soleil en lui-même, et nous avons cherché à déterminer sa nature, autant que les observations optiques nous ont permis de le faire. Nous allons maintenant étudier son activité extérieure, ce qui achèvera de nous faire un peu connaître la puissance incalculable de ce foyer de force et de vie. Son activité extérieure s'exerce de deux manières dans l'espace qui l'environne : par les radiations et par la gravitation. Étudions la première de ces deux formes d'action, en réservant la seconde pour un autre Chapitre.

§ 1. — *Influence des radiations dans l'univers.*

Nous avons beaucoup parlé des radiations lumineuses et calorifiques, mais nous les avons envisagées seulement au point de vue des idées qu'elles pouvaient nous fournir sur la constitution du Soleil ; nous devons maintenant les examiner en détail et étudier l'influence qu'elles exercent sur les planètes.

Le Soleil est, pour ainsi dire, le premier moteur duquel dépendent tous les mouvements du système planétaire non-seulement pour la régularité des orbites que décrivent les différents astres, mais aussi pour les phénomènes physiques ou physiologiques qui s'accomplissent à leur surface. Sur la Terre, en particulier, les mouvements atmosphériques, le mouvement des eaux, le développement de la végétation, la production de force qui résulte des combustions et de la nutrition des animaux, tous ces phénomènes sont dus à l'influence des radiations solaires.

L'atmosphère est une véritable machine, bien qu'on n'y voie ni rouages, ni pistons, ni leviers; des masses considérables d'air et de vapeur y sont maintenues en circulation par l'action de la chaleur solaire. C'est la force du Soleil qui, en dilatant l'air dans certaines régions, le soulève en masses considérables et produit ainsi un vide que d'autres masses gazeuses viennent combler rapidement : de là ces courants atmosphériques et cette action puissante du vent qui transporte nos vaisseaux sur les mers. C'est la force émanée du Soleil qui soulève les eaux sous forme de vapeurs, et les laisse retomber ensuite en pluie bienfaisante destinée à féconder nos campagnes. C'est encore au Soleil que nous devons ces ruisseaux qui nous désaltèrent, ces fleuves dont les eaux font mouvoir nos machines; par la vapeur enlevée à l'Océan, il alimente les neiges qui, du sommet des montagnes, distribuent le mouvement, la fécondité et la vie, qui labourent nos continents actuels, entraînant ainsi au fond des mers les matériaux qui formeront les continents et les montagnes lorsqu'une nouvelle révolution géologique aura mis un terme à l'ordre de choses actuel.

Mais, quelque chose de plus admirable encore, c'est la manière dont la force du Soleil se trouve, pour ainsi dire,

emmagasinée dans les végétaux, non-seulement dans ceux qui, encore vivants, servent à nos usages et à notre alimentation, en même temps qu'ils ornent et embellissent notre demeure ici-bas; mais aussi dans ceux qui, ensevelis depuis plusieurs milliers d'années dans les entrailles de la Terre, en sortent maintenant pour nous échauffer et pour produire la force motrice nécessaire à nos machines. Les rayons solaires, en tombant sur les plantes, ne sont pas réfléchis et dispersés comme il arrive lorsqu'ils tombent sur les pierres nues ou sur les sables du désert; ils y sont en grande partie retenus, et la force mécanique de leurs vibrations est employée à détruire les combinaisons que l'oxygène forme avec le carbone et l'hydrogène, combinaisons stables connues sous le nom d'*eau* et d'*acide carbonique*, deux éléments essentiels de l'air atmosphérique. Les plantes s'assimilent alors l'hydrogène et le carbone en formant des composés moins stables qui plus tard, soit dans nos foyers, soit dans les organes vivants des animaux, se détruisent pour reconstituer de nouveau l'eau et l'acide carbonique, en restituant la force vive que le Soleil avait dépensée dans le travail précédent. Chaque plante est donc une véritable machine dans laquelle s'élaborent ces substances éminemment combustibles qui servent à nous fournir, en l'absence du Soleil, la chaleur et la lumière, ou bien à produire, en nous servant d'aliment, la force et la chaleur vitale dont nous avons besoin. C'est donc du Soleil en dernière analyse que, d'une manière plus ou moins éloignée, dépendent tous les phénomènes de la nature et notre existence elle-même.

La manière dont s'accomplissent ces merveilleuses opérations nous est encore inconnue; nous savons seulement que ces phénomènes se produisent par l'intermédiaire des vibrations lumineuses, calorifiques et chimiques; c'est sous forme

de vibrations que l'énergie solaire se propage jusqu'à nous et exécute ces œuvres étonnantes que nous savons mettre à profit. Lorsque deux molécules sont unies par les liens de l'affinité chimique, il faut une force pour détruire cette combinaison, et la force ainsi employée produit un travail que l'on peut comparer à un travail mécanique quelconque. Par exemple, pour élever un corps à une certaine hauteur, c'est-à-dire pour séparer un corps de la Terre, il faut dépenser une certaine force et produire un certain travail; en retombant, le corps restitue la force qui avait été employée à le soulever. Le Soleil produit quelque chose de semblable entre les molécules des corps placés à la surface de la Terre, il les sépare et les déplace en les éloignant, et dans cette opération on peut dire que sa force est emmagasinée dans les végétaux, comme celle d'un homme ou d'un animal est emmagasinée dans une masse élevée à une certaine hauteur, ou comme celle d'une machine dans le volant qui tourne avec elle.

Ce que le Soleil opère de nos jours, il l'a également produit pendant les siècles innombrables qui ont précédé la création de l'homme; les végétaux qui se sont développés à certaines périodes géologiques ont été, par l'action du temps, transformés en houille et en lignites, et, lorsque nous brûlons maintenant ces substances dans les foyers de nos machines à vapeur, nous utilisons le travail qui a été fait autrefois par le Soleil.

Ces notions, que la Science a rendues si populaires, montrent quel immense pouvoir possèdent les radiations du Soleil, que nous nous proposons maintenant d'étudier en détail.

§ II. — *Distinction des radiations.*

Ce qui frappe tout d'abord, dans le rayonnement solaire, c'est la lumière qui nous éclaire et la chaleur que nous sentons en même temps; mais, outre ces deux ordres de phénomènes, il y en a un troisième qui est très-important : ce sont les actions chimiques qui accompagnent les deux autres. Aussi doit-on distinguer trois ordres d'actions qui émanent du Soleil, et que l'on confond ordinairement sous la dénomination unique de *lumière*. Ce sont : 1° l'action éclairante, qui, en agissant sur l'organe de la vue, produit des effets physiologiques d'une nature spéciale; 2° l'action thermique, qui agit indistinctement sur tous les corps en les échauffant; 3° l'action chimique, qui produit certains phénomènes de désagrégation moléculaire.

Ces activités ne sont pas trois entités distinctes; ce sont des effets différents d'une même action, consistant simplement dans une série d'ondulations qui ne diffèrent entre elles que par leur longueur et la rapidité avec laquelle elles se produisent.

Les ondes dont la longueur est comprise entre 768 et 369 millionièmes de millimètre sont capables de faire vibrer notre nerf optique; elles produisent ainsi la sensation de la lumière; la diversité des couleurs ne dépend que de la longueur des ondes : les plus grandes se trouvent dans le rouge, et elles vont en décroissant vers le violet.

A nous en tenir aux apparences les plus ordinaires, ce n'est qu'à partir de la couleur verte en allant vers le violet que les ondes lumineuses possèdent, en outre, le pouvoir de désagréger les groupes moléculaires et de produire des actions chi-

miques, en même temps qu'elles excitent à la surface de certaines substances des vibrations lumineuses assez remarquables. Ces ondes s'étendent bien au delà du spectre visible, dans une région où l'œil ne peut rien apercevoir ; on le reconnaît en employant des préparations photogéniques ou des substances d'une nature particulière qu'on appelle *fluorescentes*, du nom du *spath fluor*, qui, plongé dans ces rayons, devient lumineux.

A partir du vert en allant du côté du rouge, les ondes deviennent plus longues, et elles possèdent la propriété d'ébranler les groupes moléculaires par une action simplement physique, sans les décomposer, du moins dans les cas ordinaires; ces ondes (dites *ondes calorifiques*) s'étendent également au delà du rouge et forment ainsi une seconde partie invisible du spectre.

En réalité, cependant, il n'existe dans la nature qu'une seule et unique série d'ondes dont la longueur va constamment en décroissant à partir de l'extrémité du spectre calorifique obscur jusqu'à l'extrémité du spectre chimique dans sa partie invisible. Les ondes des couleurs moins réfrangibles que le vert ne sont pas sans quelque action chimique, comme les ondes dites *chimiques* ne sont pas sans une action thermique. Les différentes parties du spectre semblent posséder des propriétés très-diverses, mais ce résultat dépend principalement des substances que nous employons et qui sont plus sensibles à l'action de certains rayons. Ainsi donc le spectre tout entier produit des actions chimiques ; nous les attribuons ordinairement aux rayons violets, parce que ces rayons agissent avec plus d'énergie sur les sels d'argent que nous employons de préférence. D'autres substances, la chlorophylle par exemple, sont plus sensibles aux rayons jaunes. On vient de trouver des substances photographiques qui sont fortement impres-

sionnées par les rayons rouges. D'après M. Draper, si la partie violette du spectre de réfraction possède un moins grand pouvoir calorifique, cela tient à ce qu'elle est plus dilatée : si on la condense, elle devient aussi calorifique que le rouge. Entre ces deux extrêmes, il n'y a qu'une portion très-limitée jouissant de la propriété d'ébranler notre nerf optique. Enfin les rayons situés au delà du violet deviennent encore visibles pour certains yeux ; on leur attribue une teinte gris-lavande.

La *fig.* 218 nous montre l'étendue et l'intensité relative de ces différentes actions séparées l'une de l'autre, comme nous les présentent l'action dispersive des prismes et les réactions des sels d'argent. La zone PW, qui forme la base de cette figure, nous montre, dans la partie visible, les principales raies de Fraunhofer et, au delà du violet, celles qui ont été révélées par l'action chimique. En deçà du rouge et dans la zone APαBA se trouve la région qui correspond à la partie obscure des rayons thermiques. Les courbes qui se trouvent au-dessus font connaître, par leurs ordonnées, les intensités relatives de chaque radiation dans les différentes parties du spectre. L'intensité de la lumière est représentée par la courbe AMH, celle de l'action chimique par IKL, celles des radiations calorifiques par BDN. La courbe PRN représente l'intensité des rayons calorifiques de l'arc voltaïque, d'après M. Tyndall.

La courbe FO (*fig.* 219) représente la longueur relative des ondes appartenant à chaque région du spectre. Les ondes extrêmes du spectre ordinaire ont des longueurs qui sont dans le rapport de 1 à 4, 3 ; si nous prenons les deux parties obscures, pour le spectre calorifique d'un côté et pour le spectre chimique de l'autre, nous trouvons que les longueurs des ondes extrêmes sont dans le rapport de 1 à 24 : cepen-

dant il y a quelque incertitude pour les ondes les moins ré-

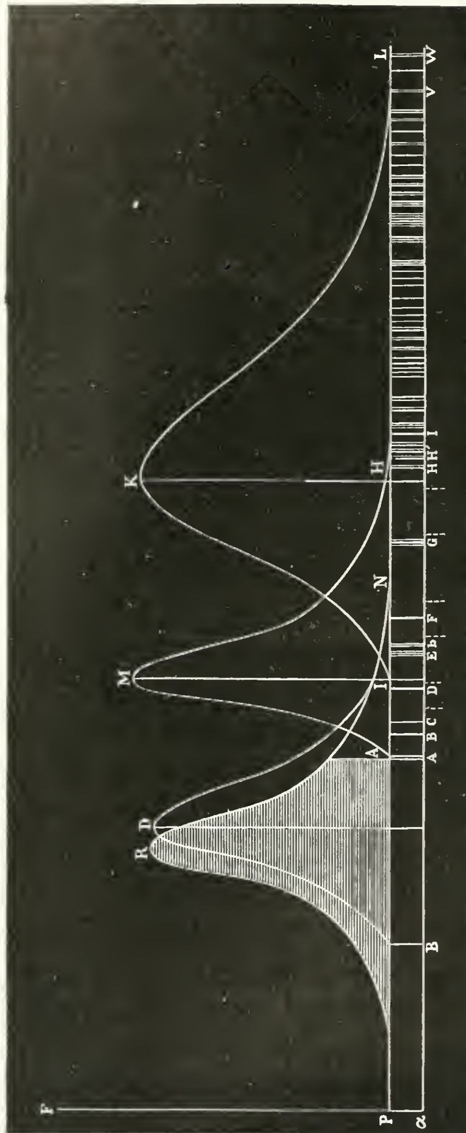


Fig. 218.

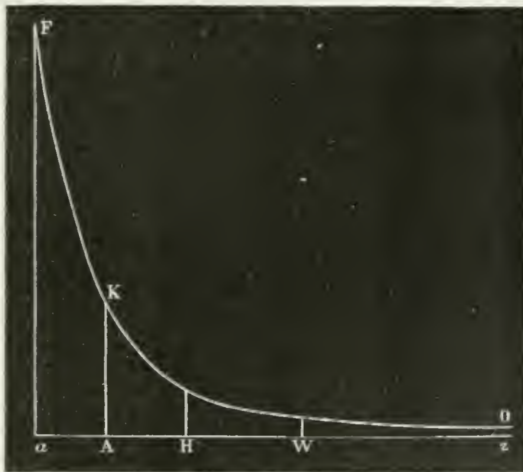
frangibles. Nous donnons ici le tableau des longueurs d'onde

qui correspondent aux points principaux, en y ajoutant le nombre des vibrations qui s'exécutent en une seconde :

	LONGUEUR en millionièmes de millimètre.	NOMBRE des vibrations en une seconde.
Limite extrême des rayons calorifiques (prisme en sel gemme)...........	4800	63000000000000
Limite du rouge...................	1445	155000000000000
Raie jaune D....................	589	509000000000000
Violet extrême H..................	396	758000000000000
Extrémité du spectre chimique........	317	946000000000000
Extrémité du spectre du cadmium	210	1364000000000000

Le premier nombre de vibrations a été donné par M. Miller, le dernier par M. Mascart.

Fig. 219.



Il est intéressant de comparer la longueur de ces vibrations à celles des ondes sonores. Les sons les plus graves que notre oreille puisse percevoir correspondent à 30 vibrations

par seconde, les plus aigus à 36 000 vibrations ; peut-être une oreille exercée peut-elle arriver à percevoir les sons correspondant à 40 000 vibrations; par conséquent les nombres extrêmes sont entre eux dans le rapport de 1 à 1300 environ. Les limites sont donc bien plus écartées l'une de l'autre que pour les vibrations éthérées connues et mesurées, et en particulier les vibrations sonores sont bien plus étendues que les vibrations lumineuses, puisque ces dernières embrassent à peine une octave. Si l'on adopte certains résultats du professeur P.-M. Garibaldi, de Gênes, on aurait pour limite inférieure des ondes thermiques, à la température de 73 degrés C., un nombre de vibrations qui ne dépasserait pas par seconde 40 000 000 000 000, de sorte que la lacune qui existe entre la série acoustique et la série thermique serait représentée par le rapport de 1 à 1 000 000 000. Il est cependant certain que les vibrations intermédiaires existent dans les solides; car, en frappant des verges très-courtes, comme l'a montré M. Kœnig, on obtient un son dont la durée est très-courte, ce qui fait qu'on peut à peine le distinguer d'un simple bruit. Il est très-difficile d'apprécier la tonalité des sons ainsi obtenus; M. Kœnig y a réussi en calculant le nombre des vibrations que doivent exécuter, vu leurs dimensions, les tiges élastiques sur lesquelles il opérait. Les chiffres ainsi obtenus sont beaucoup plus considérables que ceux que nous venons de citer. Or cette même percussion produit une élévation sensible de température, et fait, par conséquent, vibrer l'éther; mais nous manquons de moyens pour reconnaître la présence de ces ondes intermédiaires entre celles qui produisent le son et celles qui produisent la lumière.

Arrêtons-nous à ces considérations générales et étudions maintenant chaque radiation en particulier.

§ III. — *Radiation lumineuse.*

Nous nous occuperons d'abord de la radiation lumineuse, car c'est celle que nous connaissons le plus immédiatement, celle que nous pouvons le plus facilement étudier, et à laquelle ont d'abord été consacrées les différentes expressions constituant la terminologie adoptée plus tard pour les autres. Nous ne répéterons pas ici les détails que nous avons déjà donnés relativement au spectre lumineux et à l'origine des raies noires qu'on y remarque. Nous exposerons seulement ce qui a rapport à l'intensité de la lumière.

La courbe AMH (*fig.* 218) a été tracée par Fraunhofer, à l'aide d'un procédé bien imparfait; mais c'est le seul qu'on puisse employer, car il est fort difficile de comparer rigoureusement le pouvoir éclairant des rayons de différentes couleurs; nous ne pouvons que comparer à ce point de vue les sensations qu'un œil bien conformé éprouve sous l'action de différentes ondes lumineuses. La bonne constitution de l'œil est une condition très-essentielle, car il y a des individus affectés de la maladie connue sous le nom de *daltonisme,* pour lesquels les sensations du rouge et du vert se confondent. En réalité, on ne peut pas être certain que la même onde lumineuse fasse éprouver la même sensation à tous les individus, car une couleur n'est, après tout, qu'une dénomination purement conventionnelle, qui reste constante dans les cas semblables, circonstance qui rend impossible la découverte d'une différence, sauf le cas fort rare où un même individu donne le même nom à deux couleurs différentes.

Le pouvoir éclairant des différents rayons consiste donc, pour le physicien, dans l'aptitude plus ou moins grande qu'ils

possèdent d'ébranler le nerf optique de l'homme. Il est probable que la faculté de percevoir les phénomènes lumineux n'a pas la même échelle pour tous, et qu'elle est beaucoup plus étendue chez certains animaux que chez l'homme, soit du côté du rouge, soit du côté du violet. L'eau pure possède un pouvoir absorbant très-considérable pour les rayons thermiques; aussi, lorsqu'on emploie un prisme creux rempli d'eau, la chaleur ne commence à être sensible que dans le rouge, et elle a son maximum dans le jaune. Les humeurs que contient l'œil diffèrent peu de l'eau pure, et c'est là ce qui rend l'organe de la vue insensible aux rayons calorifiques.

L'étendue des ondes lumineuses sensibles à l'œil correspond ordinairement à ce qu'on appelle en acoustique une *octave*, de sorte que l'homme n'est mis en relation avec le monde éloigné que par une très-faible partie des radiations solaires. Et cependant, quelle immense variété de sensations et quelle beauté de contrastes! Nous ne voulons pas entrer dans cet ordre de considérations, mais il nous est impossible de ne pas faire ici une remarque importante. On a cru pendant longtemps que la radiation lumineuse était le seul mode d'action du Soleil sur le monde. Cependant elle est très-secondaire, et son importance est bien faible si nous la comparons aux autres radiations. Que sont donc les impressions produites sur la matière délicate de notre rétine, si nous les comparons avec les modifications que la chaleur fait éprouver à tous les corps et avec les actions moléculaires que produisent les rayons chimiques!

On a fait beaucoup de recherches afin de savoir s'il y avait des relations simples entre les longueurs d'onde et les sensations des couleurs principales. On admet, d'après Newton, une gamme connue de tous les physiciens, mais dans

laquelle, en réalité, il y a beaucoup d'arbitraire. Après la découverte de Fraunhofer, on a cherché si la position des raies principales ne correspondait pas à des intervalles musicaux, mais on n'est parvenu à aucun résultat bien certain. Ainsi l'on a trouvé que les raies C, D, H, I correspondent sensiblement aux notes musicales *ré, mi, si*, ut_2, et, de plus, la raie A serait peu éloignée de la position qui correspond à ut_1. Si l'on prend la lettre C comme correspondant au *ré*, F serait un *sol* avec une différence de $\frac{1}{81}$, c'est-à-dire d'un *comma*.

Ces relations seraient bien plus nombreuses si l'on considérait les raies qui appartiennent au spectre chimique. Ainsi M. Cornu trouve que la raie violette du magnésium, près de L, est à peu près l'harmonique aiguë de la raie *b*, les nombres de vibrations étant entre eux dans le rapport de 3 à 4 [1]. M. d'Arrest et M. Peslin ont fait des recherches très-ingénieuses sur cette question, mais sans découvrir aucune loi générale bien certaine. Voilà le résultat le plus remarquable auquel ils soient parvenus : les carrés des nombres qui mesurent les longueurs d'onde sont dans un rapport assez simple pour les différentes raies; ainsi, pour les raies C et D_3, le rapport entre les carrés serait égal à $\frac{4}{5}$. Mais tous ces rapports n'ont aucune influence relativement à la vision, car nous savons qu'il n'y a point de ressemblance entre l'harmonie musicale et ce qu'on peut appeler l'harmonie chromatique. Celle-ci existe sans doute, mais on doit l'étudier *a posteriori*, par des méthodes qui sont tout à fait en dehors de notre sujet.

La courbe des intensités lumineuses, ainsi que celle des autres radiations, n'est pas symétrique par rapport à l'ordon-

---

(1) Voir *Comptes rendus*, M. Cornu, t. LXXIII, p. 332; M. Peslin, t. LXXIV, p. 32.

née du sommet : elle monte plus rapidement qu'elle ne descend. C'est un effet dû à la réfraction du prisme. Les corps réfringents ne dévient pas les rayons lumineux proportionnellement à la longueur des ondes, mais la déviation est plus grande pour les plus petites; aussi la dispersion est-elle plus grande dans le violet. Dans les spectres produits par diffraction au moyen des réseaux, cette cause ne subsiste pas, et la courbe des intensités lumineuses est symétrique par rapport au maximum qui se trouve dans le jaune. Mossotti a vérifié par le calcul cette explication.

M. Rutherfurd construit des réseaux sur lesquels il y a 60 000 traits par pouce anglais; ces réseaux donnent des spectres admirables, avec des raies nettement tranchées; aussi peut-on les substituer aux prismes dans l'analyse spectrale. On retrouve dans les spectres de diffraction tous les résultats obtenus par Fraunhofer.

Les limites du spectre visible ne sont pas les mêmes pour tous les individus, surtout du côté du violet; il y en a qui voient une partie considérable des rayons chimiques, qui sont obscurs pour la plupart des observateurs. Cela peut tenir en partie à la phosphorescence que ces rayons développent sur la substance qui les reçoit ou dans les milieux de l'œil lui-même, milieux dont la fluorescence a été constatée.

On a cherché à comparer l'intensité de la lumière solaire avec celle des étoiles et des autres lumières connues, mais toutes ces mesures sont loin d'être précises. Bond a trouvé que le Soleil a un pouvoir éclairant représenté par 470 000 si on le compare à celui de la pleine Lune, à 622 000 000 si on le compare à celui de Vénus prise dans tout son éclat, à 5 980 000 000 si on le compare à celui de Sirius. Mais nous croyons que tous ces nombres sont beaucoup trop faibles, car, pendant une éclipse totale, la petite quantité de lumière

qui éclaire l'atmosphère est plus considérable que celle de la pleine Lune, et il serait bien difficile de déterminer numériquement le rapport de cette faible lumière avec celle de l'astre radieux.

La difficulté qu'on éprouve à comparer la lumière du Soleil avec une unité déterminée fait qu'il est à peu près impossible de constater si son éclat est constant. Les astronomes sont généralement d'accord pour ranger cet astre parmi les étoiles variables, mais on n'a pas encore pu constater ses variations d'une manière péremptoire. Si jamais on y réussit, ce sera, sans doute, par un moyen plus précis que la simple sensation de la vue; on aura probablement recours aux effets thermiques ou chimiques, ou à quelque autre phénomène susceptible d'une mesure exacte et précise. Nous savons maintenant que les taches présentent des variations périodiques; mais nous ne pouvons pas en conclure que le pouvoir éclairant du Soleil présente des variations analogues, car il est possible que la diminution d'éclat provenant de la présence des taches soit compensée par l'accroissement de lumière dû aux facules et aux granulations.

§ IV. — *Radiations thermiques.*

Nous avons déjà exposé ce qui concerne l'intensité de ces radiations; il nous reste à examiner ce qui est relatif à leur nature et à leurs propriétés.

Après avoir fait passer un faisceau de rayons solaires à travers un prisme, si on les reçoit sur un thermoscope très-délicat, ou mieux sur une pile thermo-électrique, on trouve que le maximum de chaleur correspond à une région différente, suivant la nature du prisme. Avec un prisme de verre ordi-

naire, il se trouve dans le rouge; il correspond au jaune lorsqu'on emploie un prisme creux rempli d'eau; le flint le renvoie un peu au delà du rouge; enfin, avec un prisme de sel gemme, ce maximum se trouve bien au delà du rouge, à une distance de la raie A égale à celle qui sépare les deux raies A et C.

Ces différences mirent les physiciens dans un grand embarras, jusqu'à l'époque où les expériences de Melloni résolurent la difficulté. Ce savant a montré que les différentes substances possèdent une force absorbante élective et particulière, chacune d'elles agissant sur différents rayons calorifiques, absorbant les uns et laissant passer les autres, à peu près comme les milieux colorés agissent sur la lumière blanche. Il nomma cette propriété *thermochrose*. Si l'on analysait la lumière du Soleil avec un prisme rouge, jaune ou vert, on trouverait que le maximum de pouvoir éclairant correspond à des régions différentes suivant les cas; c'est à peu près ce qui arrive pour la chaleur dans les expériences que nous venons de citer. Le sel gemme est la substance la plus diathermane que nous puissions employer pour l'analyse des rayons solaires, mais elle n'est pas complétement dépourvue de pouvoir absorbant.

Les gaz eux-mêmes possèdent la faculté d'absorber les rayons calorifiques, et, par conséquent, notre atmosphère absorbe une portion très-considérable de ces rayons. Les ondes les plus longues sont celles qui sont plus facilement absorbées; aussi un grand nombre des rayons moins réfringents qui tombent sur notre atmosphère sont arrêtés et ne parviennent pas jusqu'à nous.

L'absorption produite par les gaz simples, oxygène et azote, est extrêmement faible; si l'on fait varier la pression de 5 à 760 millimètres, cette même absorption varie à peu près dans le rapport de 1 à 1,5. Il n'en est pas de même des

gaz composés qui se trouvent dans notre atmosphère, comme l'acide carbonique, la vapeur d'eau, l'ammoniaque et quelques autres. Le professeur P.-M. Garibaldi, de Gènes, a prouvé par des expériences péremptoires que, pour une pression de 760 millimètres, ces gaz ont des pouvoirs absorbants représentés par les nombres qui suivent :

Air atmosphérique	1
Acide carbonique	92
Ammoniaque	546
Vapeur d'eau	7937

Une quantité de vapeur d'eau capable de produire une pression de 9 à 10 millimètres exerce déjà une absorption cent fois plus grande que celle de l'air atmosphérique.

Il résulte de ces propriétés qu'il nous est impossible de recevoir et, par conséquent, d'analyser toutes les radiations calorifiques du Soleil ; la courbe BDN tracée dans la *fig.* 218 ne représente que celles qui ont déjà traversé notre atmosphère en y subissant une absorption assez considérable. M. Lamansky, de Heidelberg, a examiné avec soin la partie ultra-rouge du spectre solaire ; il y a trouvé quatre maxima et quatre minima bien prononcés, mais il paraît que leur position et leur valeur est variable, selon le degré d'humidité de l'air.

M. Lamansky a trouvé des traces de chaleur jusqu'à la raie H.

Pour reconnaître les autres radiations, les physiciens ont eu recours à des sources artificielles de chaleur. M. Tyndall, en particulier, a analysé avec beaucoup de précision la source la plus active que nous connaissions, savoir : l'arc voltaïque. Pour établir plus facilement une comparaison entre les différents résultats, nous reproduisons ici trois courbes. La *fig.* 220

est due à W. Herschel ; elle représente la variation de l'intensité calorifique dans le spectre obtenu par un prisme de flint ; la partie ombrée est relative aux rayons de chaleur obscure.

La *fig.* 221 représente le spectre obtenu par M. Müller avec un prisme de sel gemme.

La *fig.* 222 donne le spectre de l'arc voltaïque obtenu par M. Tyndall, et que, pour plus de clarté, nous avons également reproduit dans la *fig.* 218.

On voit par ces courbes combien est petite la partie lumineuse représentée par la surface blanche, si on la compare à la partie obscure représentée par la surface noire ; de plus, en les comparant à la courbe des intensités calorifiques du Soleil (*fig.* 218), on voit combien notre atmosphère absorbe de rayons obscurs.

Malgré tous les soins de M. Tyndall, les milieux employés dans ses expériences ne pouvaient être absolument diathermanes; l'air de son laboratoire ne pouvait être d'une pureté parfaite, car il contenait nécessairement de la vapeur d'eau, qui possède un si grand pouvoir absorbant. Le professeur Garibaldi a expérimenté dans le vide sur la chaleur obscure du platine, porté d'abord à une température de 78 degrés, et chauffé progressivement jusqu'au rouge blanc. Il a trouvé ainsi que l'étendue des radiations obscures est au moins quatre fois et demie aussi considérable que celle des radiations lumineuses. Mais il faut observer que ces expériences ont été faites sans prisme, en absorbant la chaleur lumineuse au moyen d'une dissolution d'iode dans le sulfure de carbone. On a évité ainsi le raccourcissement de la partie obscure du spectre qui a lieu dans les expériences de M. Tyndall, ce qui doit produire un étalement plus grand que celui qu'on obtient par le procédé ordinaire.

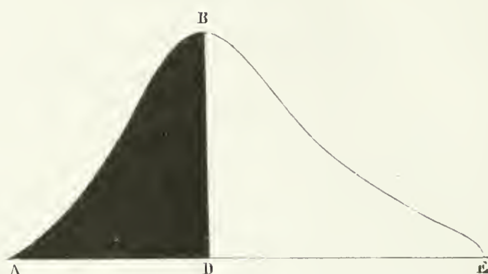
Quoi qu'il en soit de tous ces détails, il est certain qu'une

portion considérable des rayons obscurs partis du Soleil est interceptée par l'atmosphère et ne peut arriver jusqu'à la surface de la Terre; cette absorption est plus considérable pour les rayons calorifiques que pour les rayons lumineux; car les ondes, à mesure que leur longueur diminue, acquièrent un pouvoir de plus en plus grand de traverser les milieux transparents.

L'étude de ces phénomènes a fait découvrir un fait très-intéressant, qui prouve la puissance et l'énergie considérables des rayons solaires : c'est que l'intensité des radiations obscures augmente plus rapidement que celle des radiations lumineuses; nous devons en conclure que, la lumière du Soleil étant extrêmement vive, les radiations thermiques qui émanent de sa surface doivent avoir une intensité beaucoup plus grande que nous ne pouvons le supposer. On peut mettre cette conclusion en évidence en enlevant aux rayons solaires tout leur pouvoir éclairant, de manière à laisser intacte leur puissance calorifique, ce qui permet d'évaluer le rapport des deux radiations. Pour obtenir ce résultat, on fait passer un faisceau de rayons solaires à travers une couche de sulfure de carbone contenant de l'iode en dissolution. Les rayons deviennent invisibles, sans perdre leur pouvoir calorifique, et, si le vase qui contient cette dissolution a la forme d'une lentille convergente, au foyer invisible de cette lentille il se développe une température assez élevée pour déterminer l'inflammation des corps combustibles. Le professeur Garibaldi a prouvé, par des expériences semblables, que, pour le platine incandescent, le rapport des radiations lumineuses aux radiations obscures est tout au plus égal à $\frac{13}{320}$. Pour le Soleil, M. Tyndall a prouvé que la chaleur qui accompagne la partie lumineuse est seulement $\frac{1}{9}$ de celle qui se trouve dans la partie obscure.

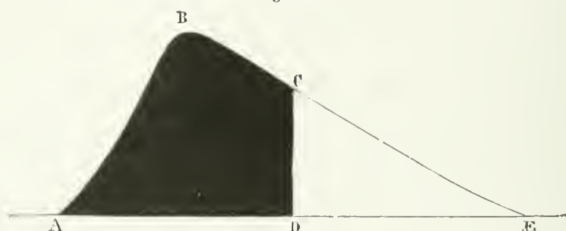
Depuis le vert jusqu'au violet, nos thermoscopes les plus

Fig. 220.



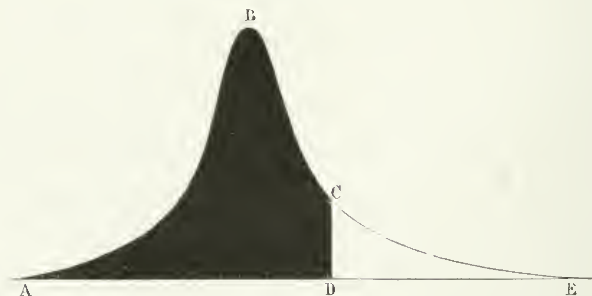
sensibles n'accusent que des traces insignifiantes de chaleur.

Fig. 221.



Il ne faut pas en conclure que les ondulations correspon-

Fig. 222.



dantes soient inactives. Draper, en les condensant, a obtenu la même intensité calorifique dans les deux moitiés du spec-

tre. D'ailleurs, c'est là que commence une nouvelle activité, celle qui a pour effet d'ébranler les groupes atomiques et de détruire les combinaisons résultant de l'affinité.

L'atmosphère terrestre, en absorbant une portion si considérable des rayons solaires, ne les anéantit pas; elle les tient en réserve pour les employer plus tard à notre avantage. D'abord, la partie qui arrive jusqu'à nous échauffe les corps et se trouve, par leur action moléculaire, transformée en chaleur de basse température à ondes très-longues; ces rayons, ainsi tranformés, ne sont plus capables de traverser l'atmosphère, ce qui produit une accumulation de chaleur dans les couches les plus basses. On peut même, en prenant certaines précautions, amener ainsi l'eau à la température de son ébullition. Saussure démontra qu'il suffit, pour cela, de faire tomber les rayons solaires sur une boîte noircie, doublée de substances non conductrices et dont l'ouverture, tournée du côté du Soleil, est recouverte de plusieurs lames de verre transparent. Un thermomètre exposé dans cette boîte indique bientôt une température supérieure à 100 degrés, car les rayons de basse température qui prennent naissance dans l'enceinte, ne pouvant traverser le verre, restent dans l'intérieur de la boîte et l'échauffent de plus en plus; et comme, d'après la loi de la radiation solaire, le thermomètre doit toujours indiquer 13 ou 14 degrés au-dessus de la température du milieu dans lequel il se trouve plongé, on arrive ainsi à une limite qui peut dépasser 100 degrés. On a même proposé d'utiliser cette chaleur pour échauffer l'eau et économiser le combustible. C'est sur ce principe que repose la *marmite solaire* imaginée par M. Mouchot, de Tours, en 1860 (¹).

(¹) *La chaleur solaire et ses applications industrielles*, par A. Mouchot. Paris,

La chaleur emmagasinée dans l'atmosphère nous rend encore un autre service. La radiation nocturne est considérablement diminuée par la présence de l'air atmosphérique, et par là se trouve ralenti et diminué le refroidissement du globe et des plantes qu'il nourrit. La vapeur d'eau agit dans ce cas avec une très-grande efficacité, et une couche d'air humide ayant quelques mètres seulement d'épaisseur arrête le refroidissement nocturne autant que le fait l'atmosphère gazeuse tout entière.

Mais la circonstance la plus importante, c'est l'absorption du calorique qui accompagne la transformation de l'eau en vapeur. L'eau s'évapore en masse considérable, surtout dans les régions équatoriales, et elle absorbe ainsi une grande quantité de chaleur de vaporisation qui demeure latente. Cette chaleur a pour destination d'être transportée vers les latitudes les plus lointaines, et d'établir, dans l'enveloppe atmosphérique qui entoure le globe, une égalité de température que la radiation directe serait loin de produire par elle-même. La quantité de chaleur qui passe ainsi de l'équateur aux pôles est extrêmement considérable, comme on le comprendra par une évaluation grossièrement approchée.

Des observations nombreuses et assez précises nous ont appris que, dans les régions équatoriales, l'évaporation enlève chaque année une couche d'eau ayant au moins 5 mètres d'épaisseur. Supposons que, dans les mêmes régions, il tombe annuellement une couche de pluie de 2 mètres; il reste encore une quantité d'eau représentée par une couche de 3 mètres et qui doit passer à l'état de vapeur dans les contrées plus rapprochées des pôles. On peut évaluer à 240 mil-

---

1869; Gauthier-Villars. — *Voir* aussi *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 4 octobre 1875.

lions de kilomètres carrés la surface sur laquelle se produit l'évaporation, et, en partant de cette donnée, on trouve que la couche de 3 mètres représente un volume d'eau égal à 720 000 kilomètres cubes. La quantité de chaleur contenue dans cette masse de vapeur est capable de faire fondre une masse de fer dont le volume est au moins égal à 400 000 kilomètres cubes ([1])!

Cette quantité énorme de chaleur passe pour ainsi dire *incognito* de l'équateur aux pôles, transportée par l'action de la vapeur, et cette vapeur, en se transformant en eau et en glace, laisse échapper toute la chaleur qu'elle avait absorbée, contribuant ainsi à adoucir le climat de ces régions désolées. Le capitaine Maury, à qui nous devons ces belles considérations, fait remarquer qu'on n'aurait jamais obtenu un pareil résultat avec un gaz proprement dit; car, pour transporter par son intermédiaire la même quantité de chaleur, il aurait fallu l'échauffer jusqu'à la température des fournaises.

Il est donc impossible de ne pas voir dans l'ensemble de la Création une Sagesse infinie qui, imposant certaines lois élémentaires à la matière, les a déterminées de telle sorte, que leurs conséquences les plus éloignées fussent en harmonie avec la conservation de la vie organique, et avec le bonheur des êtres raisonnables qui, après tant de siècles, devaient peupler la surface des planètes. C'est surtout dans ces résultats inattendus que brille la Sagesse éternelle, en nous étonnant par l'étendue de ses conceptions et par la précision avec laquelle elle parvient à ses fins.

Les observations les plus exactes nous prouvent que l'atmosphère terrestre absorbe, suivant la verticale, les $\frac{28}{100}$ de la chaleur qui tombe sur sa surface, et l'absorption totale, dans

([1]) *Voir* Maury, *Physical geography of the Sea.*

l'hémisphère illuminé, est à peu près égale aux $\frac{3}{5}$ de la chaleur incidente, de sorte qu'aux différentes hauteurs la partie transmise est représentée comme il suit :

Hauteur.	Quantité transmise.
90°	0,72
70	0,70
50	0,64
30	0,51
10	0,16
0	0,00 [1]

Ce que nous avons dit des mouvements atmosphériques peut s'appliquer à la circulation des masses liquides qui composent l'Océan. C'est la chaleur solaire qui met en mouvement ces masses considérables et détermine les courants intérieurs, dont le rôle est si important. La chaleur agit ici de deux manières : 1° en échauffant directement les eaux de l'Océan ; 2° en entretenant les vents alizés qui, par le frottement qu'ils exercent sur la surface de la mer, déterminent à l'équateur des courants océaniques dont l'influence se fait sentir jusqu'au pôle : on en voit un exemple remarquable dans le *gulf-stream*. Ces courants n'existent pas seulement à la surface, ils descendent jusqu'aux abîmes de la mer et y renouvellent l'eau et l'air pour l'entretien de la vie des êtres qui peuplent ces insondables profondeurs [2]. Contentons-nous d'indiquer cette idée ; son développement ne saurait trouver place dans les limites que nous nous sommes imposées.

---

(1) M. Ericsson donne pour cette absorption des valeurs beaucoup plus faibles ; mais, comme nos observations sont d'accord avec celles de Pouillet, de Forbes et de plusieurs autres savants, nous conserverons ces mêmes nombres jusqu'à ce que nous connaissions mieux les travaux du savant américain.

(2) Wyville-Thomson, les *Abîmes de la mer*. Paris, 1875.

§ V. — *Action chimique des rayons solaires.*

Grâce à la Photographie, tout le monde connaît l'action que les rayons lumineux exercent sur les sels d'argent : ils les décomposent et les noircissent. Mais les rayons solaires produisent un très-grand nombre de phénomènes semblables qui passent communément inaperçus ou bien ne se manifestent qu'après une longue exposition à la lumière, comme la coloration ou la décoloration de certaines substances, et surtout la respiration des végétaux, dont nous avons déjà parlé.

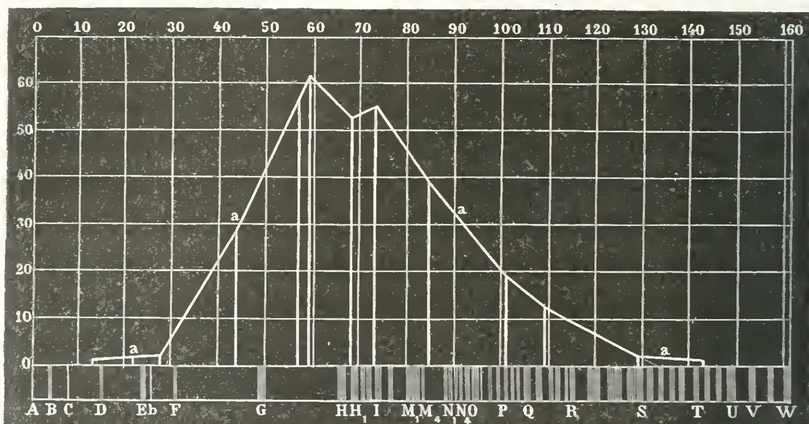
L'action chimique est, comme la chaleur, une action mécanique, et elle peut aussi être évaluée mécaniquement; mais la détermination de son équivalent présente une difficulté particulière; car, à proprement parler, les actions chimiques ne sont pas produites seulement par les causes extérieures aux corps qui réagissent entre eux, mais en général ces causes extérieures ne font que déterminer l'action des affinités moléculaires intérieures. Le Soleil ne fait donc que mettre en jeu l'activité intérieure des molécules, et dans le résultat final il est impossible de faire la part des deux causes. C'est pour cette raison que l'action solaire est différente selon les réactifs employés.

MM. Bunsen et Roscoë ont évalué l'action chimique en prenant comme point de départ la combinaison du chlore avec l'hydrogène. L'Américain Draper avait déjà remarqué que, quand un rayon de lumière diffuse agit sur ces deux gaz pour déterminer leur combinaison, il y a affaiblissement de son intensité et de son pouvoir éclairant. C'est sur ce fait fondamental de la transformation de l'énergie lumineuse des ondes éthérées en énergie chimique que MM. Bunsen et Ros-

coë ont établi leur évaluation. La *fig.* 223 représente l'intensité relative assignée par ces savants aux différentes parties du spectre. Voici les résultats auxquels ils sont parvenus.

1° L'intensité de la radiation chimique tombant sur notre atmosphère est assez grande pour produire en une minute la combinaison d'un mélange de chlore et d'hydrogène formant une couche de 35 mètres de hauteur.

Fig. 223



2° Il n'arrive sur la Terre que les $\frac{2}{5}$ environ de ces radiations.

3° L'atmosphère possède une grande puissance diffusive pour les rayons chimiques ; c'est ce qui fait que, dans les régions polaires, ces radiations sont proportionnellement plus énergiques que la radiation thermique.

4° Jusqu'à 50 degrés de latitude, les rayons chimiques directs sont plus intenses que les rayons diffus, mais au delà c'est le contraire qui a lieu. A Saint-Pétersbourg, à Rome et à l'équateur, les rayons directs sont entre eux comme les nombres 1, 2, 4.

5° Toute l'énergie chimique qui arrive du Soleil à la Terre

serait suffisante pour combiner en une minute 4 ½ millions de kilomètres cubes du mélange de chlore et d'hydrogène. (On l'obtient en multipliant 35 mètres par l'aire d'un grand cercle, qui est égale au quart de la surface terrestre.) L'énergie chimique qui se répand sur toute la sphère céleste, où notre globe, vu du Soleil, ne sous-tend qu'un angle de 17″,5, est environ 2200 millions de fois plus grande; elle est représentée par 10 000 millions de millions de kilomètres cubes. Si l'on connaissait l'équivalent thermique de cette action, on pourrait l'évaluer en force mécanique, mais il est impossible de le faire actuellement, à cause des difficultés que nous avons déjà indiquées. Telles sont les intéressantes conclusions du travail de MM. Bunsen et Roscoë.

M. Marchand [1], en exposant à la lumière une dissolution aqueuse d'acide oxalique et de perchlorure de fer, a trouvé que, sous cette influence, il se dégage 1414 centimètres cubes d'acide carbonique par minute et par mètre carré de surface illuminée, quand le Soleil est au zénith; mais l'équivalent thermique de cette réaction n'est pas connu non plus.

L'action des rayons chimiques ne produit pas seulement des combinaisons et des décompositions. D'abord, ces rayons, en pénétrant dans l'intérieur des corps, se transforment en ondes plus longues, de manière à produire un échauffement. Certains corps, qu'on désigne sous le nom de *corps fluorescents*, produisent un semblable effet à leur surface : par exemple, la dissolution de sulfate de quinine, l'infusion d'écorces de marronnier d'Inde, le verre d'urane, la dissolution alcoolique de chlorophylle, etc. Ces substances envoient par réflexion des rayons correspondant à des ondes plus

---

(1) Marchand, *Étude sur la force chimique contenue dans la lumière du Soleil*, p. 105. Grand in-8 avec figures. Paris, 1875, Gauthier-Villars.

longues que celles des rayons incidents; de plus, bien qu'éclairées par de la lumière monochromatique violette, elles réfléchissent de la lumière composée. C'est en cela que consiste la découverte intéressante et capitale de M. Stokes. Elle est complétée par celle de la *calorescence*, qui est due à M Tyndall. Une solution d'iode dans le sulfure de carbone absorbe les rayons lumineux, les convertit en rayons moins réfrangibles, et en même temps s'échauffe elle-même. Le P. Provenzali a utilisé cette propriété en faisant, avec cette solution d'iode, des thermomètres ou plutôt des photomètres d'une sensibilité extrême, se dilatant sous l'influence des radiations de la Lune, des nuages, des substances phosphorescentes.

Les rayons chimiques ont la propriété d'exciter la phosphorescence dans les corps qui en sont susceptibles, par exemple dans le célèbre phosphore de Canton. Alors aussi leur réfrangibilité est modifiée, comme on peut le voir dans le grand travail de M. Becquerel sur la lumière, car les corps phosphorescents donnent des spectres très-différents les uns des autres.

L'action moléculaire, qui augmente la longueur des ondes les plus courtes, peut aussi diminuer celle des ondes les plus longues. On en trouve un exemple frappant dans la belle expérience imaginée par M. Tyndall. Les rayons solaires tombent sur un vase contenant une dissolution d'iode dans du sulfure de carbone; les rayons obscurs sont seuls à la traverser, et ils subissent ensuite l'action d'une lentille convergente; le foyer demeure invisible; mais, si l'on y place une lame de platine, elle ne tarde pas à devenir incandescente, les rayons obscurs étant devenus lumineux.

Le Soleil n'est pas le seul corps éclairant qui envoie en même temps des rayons chimiques. Certaines sources artificielles, comme la lumière électrique et celle du magnésium,

sont même plus riches que lui, toute proportion gardée. Mais il est bien probable que, sans l'action absorbante de notre atmosphère, le Soleil l'emporterait sous ce rapport comme sous le rapport du pouvoir éclairant. Cependant il règne encore beaucoup d'incertitude sur toutes ces questions. Il y aurait lieu de faire des expériences sur un plateau très-élevé, celui de Quito par exemple, ou encore sur le sommet de l'Etna. Cette dernière station, outre qu'elle est située à une hauteur considérable, présente des avantages tout particuliers au point de vue de la pureté de l'atmosphère. On pourrait reconnaître avec plus de précision l'influence de notre atmosphère : dans des régions aussi peu élevées que les nôtres au-dessus du niveau de la mer, il ne nous est possible de l'évaluer que d'une manière indirecte et très-imparfaite.

§ VI. — *Activité magnétique du Soleil.*

Le titre de ce paragraphe surprendra sans doute plus d'un lecteur, car il semble impossible que la puissance magnétique réside dans un corps dont la température est aussi élevée et qui se trouve presque tout entier à l'état gazeux. Mais Faraday a fait voir que l'oxygène est magnétique, ainsi que plusieurs autres gaz; il a montré que l'hydrogène est diamagnétique. Ces découvertes prouvent bien que des forces de cette nature peuvent résider dans les fluides élastiques et que, par conséquent, elles sont conciliables avec tous les états de la matière.

Mais d'abord nous ne prétendons pas qu'il existe dans le Soleil une action magnétique directe, comme celle que nous observons dans l'aimant sur la Terre; nous disons seulement, et c'est un fait incontestable, que le Soleil exerce une

action sur les phénomènes magnétiques qui se manifestent sur notre globe. Que cette action soit directe ou indirecte, c'est une question purement spéculative; pour le moment, nous nous contenterons d'exposer les faits. Nous ajouterons seulement que, comme le globe terrestre ne doit pas toute sa force magnétique aux minerais d'aimant, mais à un autre principe encore peu connu, il en peut être de même du Soleil. En effet, d'après les travaux de Gauss, l'intensité absolue du magnétisme de la Terre est telle que chaque mètre cube de la substance qui la compose équivaut à huit barreaux d'acier pesant chacun une livre (450^{gr}) [1] et aimantés à saturation. Or les matières qui entrent dans la composition de notre globe sont loin de présenter une aussi grande capacité magnétique, qu'on trouverait à peine dans les minerais de fer. Nous savons maintenant que l'électrité produit des effets magnétiques et qu'un corps entouré de courants peut représenter un aimant : il n'est donc plus nécessaire de supposer l'existence de minéraux particuliers pour expliquer le magnétisme du globe.

L'influence du Soleil sur le magnétisme terrestre a été mise en évidence par les travaux accomplis depuis un demi-siècle.

Les Anglais ont particulièrement contribué, pendant les dernières années, à mettre en évidence les lois qui régissent ces mystérieux phénomènes. Ils ont érigé de nombreux observatoires magnétiques dans les deux hémisphères, et les travaux qu'ils ont exécutés ont conduit aux conclusions suivantes :

1° Lorsqu'un barreau aimanté est librement suspendu, sa position par rapport à la Terre n'est pas absolument fixe;

---

(1) *Voir* Gauss, *Théorie générale du magnétisme terrestre*, n° 30.

elle varie continuellement, et ces variations présentent une période diurne et une période annuelle. Pour déterminer la force magnétique, on étudie ordinairement sa déclinaison, son inclinaison et son intensité; on peut encore évaluer trois composantes rectangulaires, l'une verticale, les deux autres horizontales et dirigées l'une dans le plan du méridien magnétique, l'autre perpendiculairement à ce même plan.

Considérons, dans la boussole de déclinaison, l'extrémité qui est dirigée vers le Soleil, c'est-à-dire le pôle sud dans notre hémisphère et le pôle nord dans l'autre. Cette extrémité semble fuir le Soleil à partir du moment où il se lève, et le mouvement cesse une heure et demie après que cet astre a passé par le méridien magnétique; à partir de cet instant, l'aiguille revient en arrière jusqu'au coucher du Soleil. Pendant la nuit ce mouvement se répète, mais son amplitude est beaucoup moins grande.

2° On reconnaît encore dans le mouvement de l'aiguille aimantée une période annuelle. L'oscillation diurne de la boussole de déclinaison résulte de deux éléments, l'un constant, l'autre dépendant de la déclinaison du Soleil. Ces deux mouvements s'ajoutent ou se retranchent suivant que le Soleil est dans le même hémisphère que l'aiguille ou dans l'hémisphère opposé.

3° La force horizontale, que l'on mesure à l'aide d'un barreau disposé perpendiculairement au méridien magnétique, est sujette à des oscillations pareilles, mais les maxima et les minima se trouvent à trois heures de distance de ceux de la déclinaison.

4° Il y a un maximum et un minimum annuels, indépendants de l'hémisphère où se trouve le Soleil, mais dépendant de sa position, apogée ou périgée.

5° Outre les variations régulières et normales, les barreaux

aimantés sont sujets à des variations extraordinaires qui dépendent des aurores boréales et des bourrasques électriques de notre atmosphère.

6° Enfin l'amplitude de l'oscillation diurne est très-variable, et, dans une période de onze ans environ, elle peut varier du simple au double.

Mais la circonstance la plus extraordinaire, c'est que les maxima et les minima de la variation diurne coïncident avec les maxima et les minima des aurores boréales, et avec les maxima et les minima des taches visibles sur le Soleil. La même variation dans les oscillations périodiques se retrouve encore à l'époque des perturbations extraordinaires auxquelles on donne le nom d'*orages magnétiques*. Les lois que nous venons d'exposer, relativement aux variations diurnes et annuelles, prouvent avec évidence que le Soleil exerce une influence marquée sur les phénomènes magnétiques, mais elles ne nous apprennent pas si cette influence provient de son action calorifique ou bien des phénomènes électriques que les radiations solaires développent dans notre atmosphère. Mais la coïncidence de la période des taches et de la période magnétique nous semble décisive. Cette relation est si étroite que M. Wolf, de Zurich, partant du nombre relatif des taches, a pu calculer la valeur moyenne des variations diurnes de l'aiguille aimantée [1].

Comme cette dernière relation est très-importante, nous devons la mettre en évidence, en rapportant un extrait du tableau comparatif de ces phénomènes. Nous le tirons des travaux de MM. Wolf et Fritz, déjà mentionnés ailleurs, en y ajoutant des particularités intéressantes.

---

[1] Voir *Mittheilungen*, vol. II, p. 166.

MAXIMA des taches.	MAXIMA des aurores boréales.	VARIATION DIURNE de la boussole (moyenne).
1706	1707	//
1718	1721	40′ Londres (Graham).
1728	1728	//
1739	1738	//
1750	1749	//
1761	1760	//
1770	1769	//
1779	1779	//
1788	1788	23,0 Paris (Cassini)
1804	1804	//
1817	1816	//
1830	1830	13,07 Paris.
1837	1839	11,47 Munich.
1848	1848	11,55
1860	1859	11,17
1871	1871	11,13 Rome

MINIMA des taches.	MINIMA des aurores boréales.	VARIATION DIURNE de la boussole.
1698	1700	//
1712	1714	//
1723	1724	//
1733	1733	//
1745	1745	//
1758	1755	//
1766	1766	//
1776	1776	//
1785	1785	16′,9 Paris (Cassini).
1799	1799	//
1811	1811	//
1823	1823	8,18 Göttingue.
1834	1834	7,79 Munich.
1844	1844	5,24
1856	1856	5,02
1867	1867	5,05
1876	....	6,55 Rome, 1er semestre.

Malheureusement les observations magnétiques nous font presque complétement défaut pour les époques antérieures à 1823; mais les dernières périodes suffisent pour nous empêcher de craindre une déception.

Pour mieux faire ressortir le parallélisme qui existe entre la marche de l'aiguille aimantée et la fréquence des taches, nous avons réuni dans le tableau suivant les résultats de dix-sept années d'observations. Nous avons mis en regard la variation magnétique à Rome et à Prague pour faire voir qu'il ne s'agit pas ici de phénomènes locaux, mais de faits d'ordre cosmique, et qui sont généraux pour le globe terrestre. Le lecteur pourra se reporter à ce que nous avons dit au § II du Chapitre VII du Livre II, p. 180 et suivantes.

L'année 1876 offre pour les taches un minimum assez prononcé, et le minimum de la variation diurne s'accuse déjà nettement; comme l'année n'est pas finie, nous n'avons pu enregistrer dans ce tableau que le résultat du premier semestre, en doublant le nombre des taches observées jusqu'en juin.

ANNÉE MÉTÉOROLOGIQUE.	VARIATION DIURNE DE LA BOUSSOLE à Rome.	VARIATION DIURNE DE LA BOUSSOLE à Prague.	NOMBRE des groupes de taches.
1859..........	10′,871	10′,37	257
1860..........	10,984	10,05	251
1861..........	9,596	9,17	251
1862..........	8,995	8,59	112
1863..........	7,861	8,84	105
1864..........	8,377	8,02	97
1865..........	7,591	8,14	88
1866..........	7,143	7,65	81
1867..........	6,585	7,09	32
1868..........	7,132	8,15	92
1869..........	8,953	9,44	198
1870..........	10,966	11,41	262
1871..........	11,130	11,60	304
1872..........	10,653	10,70	292
1873..........	9,015	9,05	200
1874..........	8,110	″	154
1875..........	6,968	″	86
1876..........	6,55 (*a*)	″	48 (*a*)

(*a*) Premier semestre.

En discutant plus sérieusement ces résultats, il semble qu'on aperçoive la trace d'une seconde période semi-séculaire de cinquante-cinq ans et demi ; mais, comme elle n'est pas certaine, faute d'observations anciennes, nous nous contenterons de l'indiquer sans en dire davantage.

L'existence de la période undécennale a donc été confirmée encore par des observations faites au Collége Romain pendant les dix-sept dernières années. Nous avions précisément, dans ce dessein, érigé un observatoire magnétique, et, à partir de 1858, nous n'avons pas cessé de compter et de dessiner toutes les taches solaires en correspondance avec les observations magnétiques faites tous les jours sept fois au moins, aux heures tropiques où ont lieu les maxima

et les minima des déviations des barreaux. Ce n'est pas seulement la déclinaison qui suit la marche des taches, mais les forces verticale et horizontale ont la même allure d'après M. Sabine, qui l'a constaté pour les observatoires anglais de Sainte-Hélène, de Hobarton en Tasmanie, de Toronto au Canada, de Madras dans l'Inde; pour celui de Philadelphie au Girard College; pour ceux de Prague, Vienne, Saint-Pétersbourg, Rome, etc.; de sorte que ce phénomène est d'ordre cosmique.

Ce n'est pas seulement la marche diurne des phénomènes ordinaires qui est modifiée, mais encore le nombre et la grandeur des perturbations extraordinaires sont très-différents selon l'état de l'astre central. On a constaté que les époques des perturbations magnétiques coïncident avec l'apparition des taches, ce que notre collègue, le P. Ferrari, a confirmé par une longue suite d'observations de dix-sept ans, qu'il a discutées [1].

Les astronomes admettent donc unanimement le fait d'une période undécennale dans les variations du magnétisme terrestre, coïncidant avec une période semblable dans la variation des taches solaires. Il nous resterait maintenant à étudier les protubérances, mais la durée des observations est encore trop peu considérable pour que nous puissions en tirer une conclusion sérieuse. Cependant nous savons avec certitude qu'il existe un grand nombre de coïncidences entre les éruptions solaires et les variations du magnétisme terrestre; d'un autre côté, les éruptions et les taches sont certainement dues à des causes de même ordre et de même nature : il est donc impossible de douter qu'il n'y ait une relation intime entre les variations du magnétisme terrestre et celles des protubé-

---

[1] Voir *Bullettino meteorologico del Collegio Romano*, 1874, juillet et suiv. 1875.

rances solaires : c'est à l'avenir à faire connaître la cause véritable de cette relation.

M. Hornstein a cherché à déterminer la durée de la rotation du Soleil d'après la durée des variations périodiques du magnétisme observées à Prague et à Vienne : il est arrivé à un résultat satisfaisant. Le résultat ne serait pas aussi heureux si l'on prenait comme point de départ les observations magnétiques de Greenwich; c'est que cette dernière station présente une très-grande irrégularité.

Nous devons donc admettre l'existence d'une relation incontestable entre les variations de l'activité solaire et celles du magnétisme terrestre.

Quelque inattendue que soit cette conclusion, elle n'en est pas moins certaine; malheureusement cette relation est plus difficile à expliquer qu'à constater. L'influence du Soleil sur l'aiguille aimantée peut être directe ou indirecte; elle est directe si, par une action magnétique qui lui est propre ou par des courants électriques dont il est le siége, le Soleil exerce par lui-même une action sur la boussole ou sur l'aimant terrestre; elle est indirecte s'il produit dans l'état du globe des changements physiques capables de modifier le magnétisme terrestre ou les courants telluriques.

La première opinion, celle d'une action directe du Soleil, a été soutenue par M. Sabine, et nous l'avons autrefois partagée. Il est sans doute difficile de prouver que la matière qui compose le Soleil jouisse d'un véritable pouvoir magnétique; mais il peut fort bien se faire que cet astre soit environné de courants électriques puissants qui agissent à distance comme de véritables aimants. Le Soleil ne serait pas le seul corps céleste présentant une action semblable, car la Lune exerce une influence, faible il est vrai, mais incontestable, sur l'aiguille aimantée.

Nous avons précédemment montré de la répugnance à admettre que l'électricité se communique directement du Soleil à la Terre : il n'en est pas de même du magnétisme. Tous les savants admettent que l'action magnétique s'exerce à travers le vide; il est vrai que cette affirmation n'est pas démontrée d'une manière absolue, puisqu'elle repose uniquement sur des expériences relatives au vide barométrique; mais elle est confirmée par tant de phénomènes, et en particulier par la manière dont se transmet l'action magnétique à travers les corps solides, qu'on peut la regarder comme certaine. Si donc l'état magnétique ou diamagnétique du Soleil se modifie dans les crises violentes qui agitent sa masse, ces modifications peuvent bien se faire sentir jusque sur la Terre et sur les autres planètes.

On s'est demandé, dans ces dernières années, si le magnétisme terrestre subit des variations particulières pendant les éclipses. L'observation ne nous a rien appris de net et de définitif à cet égard : il paraît cependant certain que l'aiguille aimantée subit une action appréciable dans la zone de la totalité. Du reste, ce résultat serait tout à fait vraisemblable. Nous savons que la Lune est magnétique. Or, si l'on interpose un corps magnétique entre une aiguille aimantée et l'aimant qui agit sur elle, la position d'équilibre de l'aiguille se trouve modifiée. La Lune peut bien agir de la même manière et modifier par sa présence l'action que le Soleil exerce sur le magnétisme terrestre, surtout dans les régions où l'éclipse est totale et centrale. Nous sommes cependant plus disposé à attribuer ces variations aux changements météorologiques qui se produisent toujours au moment de l'éclipse.

La seconde opinion, celle d'une action indirecte du Soleil, nous paraît donc plus probable. Nous voyons en effet que la

période undécennale des variations diurnes a une relation certaine avec les aurores boréales, et la valeur absolue des variations dépend d'une manière incontestable du nombre des aurores. Les aurores polaires sont certainement des phénomènes météorologiques dus à l'électricité qui est transportée de l'équateur aux pôles à travers les régions supérieures de l'atmosphère. Cette électricité fait naître sur le globe terrestre de véritables courants qui agissent sur l'aiguille aimantée. L'existence de ces courants telluriques est aujourd'hui parfaitement prouvée; ils produisent, dans les fils télégraphiques, des courants dérivés, capables quelquefois de donner des étincelles. Pendant quatre ans que nous avons eu à notre disposition un fil télégraphique de 50 kilomètres, nous avons trouvé que ces courants existaient *toujours* et que, pendant les perturbations, ils avaient une grande intensité. Dernièrement, M. Airy a tiré des observations de Greenwich la conclusion que tous les mouvements magnétiques sont dus à des courants circulant dans la Terre.

L'électricité étant la cause immédiate de toutes ces perturbations extraordinaires, on pourrait rattacher à la même cause les variations périodiques de chaque jour; il est bien facile de comprendre qu'il existe chaque jour, dans l'atmosphère, une variation périodique capable de produire ce résultat. Cette variation se relie principalement aux différentes phases que présente l'état de la vapeur d'eau. On avait essayé d'expliquer cette variation uniquement par la marche du thermomètre; mais l'influence de la température suffirait tout au plus à rendre compte des oscillations de la déclinaison, les seules que l'on connût alors; maintenant qu'on connaît les variations de l'inclinaison et de la force horizontale, il faut avoir recours à un autre mode d'explication. Le seul possible, selon nous, consiste à admettre que les varia-

tions de la température n'agissent que d'une manière indirecte sur le magnétisme, en modifiant l'état électrique du globe par l'intermédiaire des vapeurs.

Quoique cette théorie paraisse la plus séduisante, et que nous la regardions comme la plus probable, elle ne laisse cependant pas de présenter quelques difficultés. Dans l'état actuel de la Science, on ne saurait trouver avec certitude le lien qui relie ces variations électriques avec celles des taches. Sans doute la formation d'une tache doit être accompagnée de phénomènes électriques; mais nous ne saurions imaginer comment ces phénomènes peuvent réagir sur nos aiguilles aimantées. Quant aux aurores boréales que l'on voit quelquefois apparaître simultanément dans les deux hémisphères, elles ne coïncident que rarement d'une manière rigoureuse avec l'apparition individuelle des taches, et si cette coïncidence se présente quelquefois, on ne doit pas y attacher trop d'importance, car nous ne pouvons pas constater le moment où se forment les taches qui prennent naissance dans l'hémisphère du Soleil opposé à celui que nous voyons. On ne peut donc pas établir entre ces deux ordres de phénomènes une relation de cause à effet.

Dans le siècle dernier, Mairan chercha à rattacher les aurores boréales à l'atmosphère solaire; mais sa théorie suppose que l'atmosphère du Soleil s'étend jusqu'à la Terre. Il était alors impossible de soutenir cette hypothèse par des arguments directs; mais elle a acquis une certaine probabilité depuis la découverte des éruptions solaires : il n'est pas impossible en effet que l'atmosphère du Soleil se confonde avec la lumière zodiacale. Nous ferons cependant remarquer que la matière qui constitue le phénomène de la lumière zodiacale, bien qu'elle s'étende jusqu'à la Terre, diffère essentiellement des aurores polaires; nous avons déjà fait voir que sa

faible densité ne permet pas de croire qu'elle serve à la transmission de l'électricité statique.

Tout ce qu'on peut dire actuellement, c'est que la périodicité des taches suppose une périodicité dans l'activité solaire; de même que les régions polaires du Soleil ne présentent jamais de taches, peut-être parce qu'en ces points l'activité est moins grande, de même le corps solaire tout entier, aux époques de minimum, serait dans un état de tranquillité et de repos général. Cette hypothèse serait confirmée les variations du diamètre solaire; d'après les recherches du P. Rosa et de M. Wolf, ces variations seraient périodiques et leur période coïnciderait avec celle des variations des taches. Les variations de cette activité pourraient bien se communiquer à la Terre, soit par le moyen de la chaleur, soit par quelque autre moyen encore inconnu, par exemple l'induction électrodynamique, produisant ainsi sur notre globe des phénomènes météorologiques ou électriques.

Tout ce que nous venons de dire n'est, bien entendu, qu'une simple conjecture, car cette question est une de celles dont nous devons léguer la solution aux générations qui viendront après nous. Pour la résoudre, il faudra trouver un moyen plus parfait de mesurer exactement les radiations solaires; de plus, il faudra mesurer ces radiations pendant de longues périodes, afin de constater leurs variations et les limites entre lesquelles elles sont comprises; ces mesures devront se faire en différents endroits des deux hémisphères terrestres, afin d'éviter les influences locales. C'est seulement après avoir rempli ce programme qu'on pourra se former une opinion et admettre une théorie avec connaissance de cause. Le lecteur peut juger combien nous en sommes encore éloignés.

CHAPITRE II.

GRANDEUR DU SYSTÈME SOLAIRE.

§ I. — *Détermination de la distance des corps célestes.*

Toute distance d'un objet inaccessible doit être déterminée par des opérations géométriques : tel est le cas du Soleil. Sa distance à la Terre, qui est l'étalon pour la mesure de toute dimension absolue dans le ciel, ne peut être obtenue que par

Fig. 224.



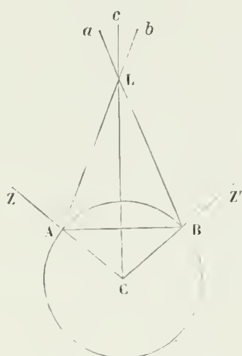
des opérations de cette nature. Au fond, c'est toujours l'application du principe en vertu duquel un arpenteur détermine la distance du point inaccessible C par la mesure d'une base AB convenablement choisie et des deux angles adjacents CAB et CBA (*fig.* 224). L'astronome n'a en propre que le procédé par lequel il mesure la base et les deux angles, procédé qui varie selon les corps dont il s'occupe et qui prend des formes si particulières que parfois le principe se trouve entièrement masqué par les détails du procédé de mesure.

La base du triangle qui sert à déterminer la distance d'un corps céleste est invariablement sur la Terre, et la petitesse

de celle-ci à côté des distances célestes est la cause des difficultés que rencontre la solution du problème.

Supposons qu'il s'agisse de déterminer la distance de la Lune à la Terre; ce satellite étant le corps le plus rapproché de nous, l'opération sera relativement facile. En laissant de côté les transformations que subit le procédé par l'application des artifices du calcul mathématique, voici l'esprit de la méthode. Supposons deux observateurs, A et B, placés aussi

Fig. 225.



loin que possible l'un de l'autre, mais sous le même méridien, et de manière qu'ils puissent simultanément observer la Lune L. Ils détermineront les distances zénithales de l'astre LAZ, LBZ' (*fig.* 225); et, après les avoir corrigées de la réfraction atmosphérique, ils en concluront les angles supplémentaires LAC, LBC que font ces lignes visuelles avec le rayon terrestre aux deux stations. On connaît les rayons terrestres AC et BC, avec l'angle ACB, qui est la somme des deux latitudes géographiques, de sorte qu'on peut calculer la corde AB. Cette corde est la véritable *base* de notre triangulation. Maintenant, en soustrayant des angles LAC et LBC les angles respectifs CAB et CBA, on aura les angles adjacents à la base

LAB, LBA, qui sont nécessaires à notre calcul ; on trouvera ainsi les côtés LA et LB, qui représentent les distances de la Lune à chacun des observateurs. Mais les astronomes ont besoin de connaître la distance de la Lune au centre de la Terre, car c'est à ce centre que sont rapportés tous les mouvements du satellite : on déduit facilement la distance LC de LA et LB, car elle forme l'un des côtés du triangle LAC, dont on connaît déjà les autres côtés AC, AL et l'angle compris LAC. C'est ainsi qu'on arrive à exprimer la distance de l'astre LC en rayons du g obe terrestre.

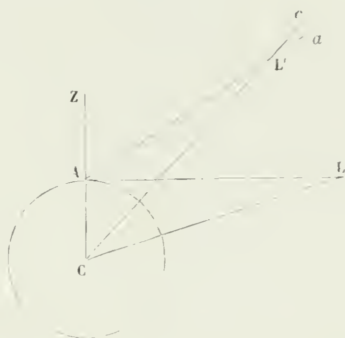
Il est évident que les deux lignes visuelles AL, BL, étant prolongées au delà de L, marquent sur la sphère céleste deux points différents *a*, *b*, qui sont les deux positions apparentes de la Lune ; l'angle ALB = *a*L*b*, qui mesure la différence des deux positions apparentes, se nomme *parallaxe*. Il varie selon la position des observateurs, la hauteur et la distance de l'astre. S'il y avait un observateur au centre de la Terre, en C, il verrait la Lune en *c*, et entre l'observateur en C et l'autre en A on aurait une parallaxe ALC. Si l'on connaissait cet angle ALC, le rayon AC, et l'autre angle LAC par l'opération précédente, on pourrait également calculer la distance LC. Donc l'essentiel est de connaître la parallaxe pour avoir la distance de l'astre : de là vient que pour les astronomes les deux expressions sont synonymes.

La parallaxe abaisse toujours l'astre, c'est-à-dire l'éloigne toujours du zénith vrai ; l'observateur A (*fig.* 226), qui voit la Lune en *a*, la verra toujours plus éloignée de la verticale que l'observateur C, qui serait supposé au centre de la Terre. La valeur de la parallaxe dépend, *cæteris paribus*, de la hauteur de l'astre. Le nombre constant que les astronomes désignent par ce mot de parallaxe est la *parallaxe horizontale équatoriale* ALC, c'est-à-dire la valeur particulière que prend

la parallaxe de l'astre lorsqu'il se trouve à l'horizon d'un lieu A situé sous l'équateur. Toutes les autres valeurs de la parallaxe sont des fonctions très simples de celle-ci et de la hauteur de l'astre.

C'est ainsi que le problème de l'arpenteur se trouve transformé dans le problème astronomique; pour obtenir la *distance* du Soleil, il faut mesurer sa parallaxe. Les anciens astronomes tentèrent de l'évaluer; mais il ne leur était même pas possible de déterminer la parallaxe lunaire par un pro-

Fig. 226.



cédé aussi direct, par la simple raison que l'observation simultanée que nous avons supposée était impraticable pour eux; on ne pourrait en effet placer deux observateurs dans les positions voulues sur les continents connus des anciens. Ils y suppléèrent cependant d'une manière ingénieuse. Soit (*fig.* 227) T le centre de la Terre, A l'observateur; il est clair que, si l'on observe la Lune en L et L' assez près du lever et du coucher, l'angle LAL' compris entre les rayons visuels AL et AL' sera bien plus grand que l'angle LTL', qui a son sommet au centre de la Terre. Or l'angle LTL' peut très-bien se déduire du mouvement propre de la Lune dans l'intervalle de temps écoulé entre les deux observations en L et L'.

En comparant alors cet angle avec l'angle LAL' qu'on observe à la station A, on peut calculer la parallaxe lunaire, puisque la différence des deux angles est précisément la somme des deux parallaxes rapportées au parallèle du mouvement diurne de la Lune, que les astronomes appellent *parallaxe des angles horaires*. Connaissant d'une manière assez approchée le mouvement propre de la Lune, on obtient ainsi sans peine la valeur de la parallaxe qui produit cette diffé-

Fig. 227.



rence. D'une manière ou d'une autre, on arrive donc facilement à une évaluation plus ou moins exacte de la distance de notre satellite qui, n'étant que d'environ 60 rayons terrestres, ne produit cependant qu'un déplacement maximum d'un peu plus de 1 degré.

§ II. — *Mesure de la distance du Soleil.*

On croirait au premier abord que la méthode indiquée ci-dessus pour la Lune pourrait servir aussi pour le Soleil; mais, dans la pratique, les difficultés seraient insurmontables. L'angle au Soleil est si petit, et les meilleures mesures

des distances zénithales directes sont sujettes à des erreurs relativement si fortes, que le résultat n'aurait aucune valeur. Les réfractions surtout sont si irrégulières et si incertaines, que, malgré la perfection des instruments actuels, on ne pourrait répondre d'une seconde, c'est-à-dire de $\frac{1}{8}$ de la valeur de la parallaxe. Déjà même pour la Lune on n'emploie pas les distances zénithales directes, qui seraient trop défectueuses ; au contraire, on emploie les distances rapportées aux étoiles ; c'est-à-dire qu'on compare la Lune à une même

Fig. 228.



étoile dans les deux stations, et l'angle $a\mathrm{L}b$ se déduit de la différence ab des distances $a\Sigma$, $b\Sigma$ entre la Lune et une étoile fixe voisine Σ (*fig.* 228).

De là la nécessité en tous temps d'avoir recours à des moyens indirects. Nous ne nous occuperons pas de tous ceux qui ont été employés par les anciens, lesquels, tout ingénieux qu'ils fussent, n'ont donné aucun résultat ; nous en indiquerons seulement un qui fut imaginé par Aristarque. Cette méthode fameuse consistait à déduire la distance du Soleil de celle de la Lune de la manière suivante. La Lune est un globe dont le Soleil éclaire toujours un hémisphère, et la

ligne de séparation de l'ombre et de la lumière est un cercle. Ce cercle nous apparaît généralement sous la forme d'une ellipse qui dessine le contour de l'ombre ; mais, si la Terre T (*fig.* 229) est dans le plan du cercle, ce contour devient une ligne droite. Dans ce cas l'angle entre la Terre et le Soleil vu de la Lune serait de 90 degrés. Si donc nous guettons le moment où la phase lunaire est terminée par une ligne droite, ce qui arrive au premier et au dernier quartier, et qu'alors on mesure l'angle STL, nous aurons les éléments nécessaires

Fig. 229.



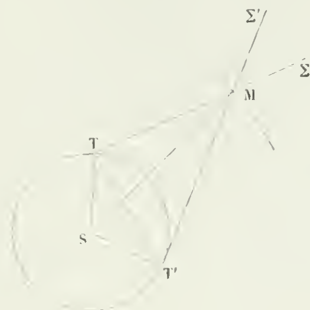
pour la résolution du triangle rectangle STL, et nous aurons ST en fonction de LT. Aristarque avait trouvé ST = 19 fois LT ; cela supposerait l'angle LTS de 87 degrés, et l'angle au Soleil LST de 3 degrés. Mais ce résultat est très-inexact, car l'angle au Soleil ne peut pas même atteindre 9 minutes. Cet insuccès vient de la difficulté de saisir à l'œil nu le moment où la limite de l'ombre est une ligne droite, et, à cause des aspérités lunaires, cela est également impossible avec les lunettes. Riccioli prouva que cet angle au Soleil n'atteignait pas 30 minutes, ce qui portait la distance du Soleil à la Terre à 115 fois celle de la Lune, c'est-à-dire à 6900 rayons terrestres ; mais ce résultat ne représente pas encore le tiers de la valeur véritable.

Cassini, après avoir trouvé une règle assez exacte pour cal-

culer les réfractions, ce qui lui permit de débarrasser les observations de la principale source d'erreur, appliqua aux comètes la méthode de la parallaxe des angles horaires, que nous avons indiquée ci-dessus pour la Lune, et en conclut qu'elles étaient bien plus éloignées que la Lune ; mais son procédé se trouva tout à fait en défaut pour le Soleil, car il obtint pour la parallaxe solaire une valeur plus petite que les erreurs que comportaient ses observations.

Heureusement, pour évaluer cette distance, il n'est pas nécessaire d'avoir recours au Soleil lui-même : il suffit de

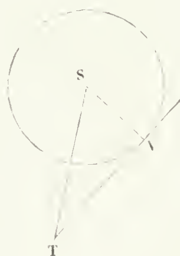
Fig. 230.



connaître la distance d'une planète quelconque pour en déduire celle du Soleil. Pour le bien comprendre, il faut nous rappeler la grande découverte de Kepler. Occupé à fixer l'orbite de Mars, arrêté par mille difficultés des anciennes théories, Kepler se décida à les rejeter toutes, et à déterminer graphiquement et par points la forme de son orbite, au moyen des mesures des distances directes de la planète au Soleil. Pour cela, il appliqua le principe de l'arpentage ou des triangulations, exposé ci-dessus. Soient S (*fig.* 230) le Soleil, M Mars et T la Terre, à une époque donnée ; on peut toujours obtenir l'angle à la Terre STM entre le Soleil et Mars, angle qu'on appelle *élongation*. Les anciens connaissaient assez bien

le temps des révolutions de toutes les planètes rapportées au Soleil; car, au moyen des oppositions, ils pouvaient déterminer ces durées, qu'ils observaient de la Terre comme s'ils avaient été sur le Soleil. Cela donné, il était facile de choisir une seconde observation éloignée de la première d'un nombre de jours égal au temps qu'emploie Mars à parcourir son orbite autour du Soleil, et qui est de 687 jours. Après ce laps de temps, Mars se trouvait certainement au même point de l'espace qu'il occupait à la première observation, quoique sa position apparente vue de la Terre se projetât sur d'autres étoiles; Mars dans ces conditions représentait un point fixe inaccessible, tandis que la Terre avait fait autour du Soleil un tour entier plus un certain arc, et se trouvait par exemple en T′. Alors raisonnant sur cette figure comme sur la *fig.* 225, on trouve facilement la distance SM; car on connaît les rayons ST, ST′ de l'orbite terrestre et l'arc parcouru TST′, on calcule la base TT′, et de là on conclut TM et SM. Par ce procédé, Kepler détermina les distances au Soleil de

Fig. 231.

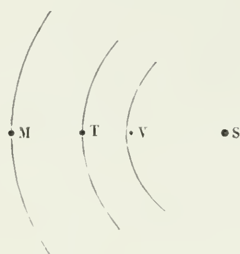


toutes les planètes supérieures. Pour les planètes inférieures, le problème est plus simple; car au moment où Vénus, par exemple, arrive au maximum d'élongation du Soleil, si l'on tire une tangente à son orbite, on déduit facilement la dis-

tance SV du triangle rectangle SVT (*fig.* 231), en supposant toujours connu le rayon de l'orbite terrestre ST.

Les distances planétaires ainsi connues, après les avoir corrigées des effets des inclinaisons et des excentricités, Kepler les compara aux temps des révolutions des planètes, et trouva la loi fameuse qui porte son nom et d'après laquelle *les carrés des temps de révolution sont entre eux comme les cubes des distances moyennes.* Il résulte de cette loi que, si l'on détermine la distance d'une planète à une autre planète quelconque, à un moment quelconque, la distance du Soleil à

Fig. 232.



l'une ou l'autre de ces planètes s'en déduit immédiatement, et par suite aussi sa distance à toutes les autres planètes (¹).

Or, parmi les planètes, il y en a deux, Mars et Vénus, qui s'approchent de la Terre bien plus près que le Soleil; Mars (*fig.* 232) vient dans son opposition à moitié de la distance du

(¹) En désignant par a, a' les distances moyennes des planètes au Soleil, et par T, T' leurs temps de révolution, la loi de Kepler peut s'écrire comme il suit :

$$\frac{a^3}{a'^3} = \frac{T^2}{T'^2},$$

d'où l'on tire

$$\frac{a}{a'} = \frac{T^{\frac{2}{3}}}{T'^{\frac{2}{3}}}, \quad \text{et} \quad \frac{a - a'}{a'} = \frac{T^{\frac{2}{3}} - T'^{\frac{2}{3}}}{T'^{\frac{2}{3}}}.$$

Connaissant $a - a'$, on aura a', puis les distances de toutes les autres planètes.

Soleil à la Terre, et Vénus dans sa conjonction inférieure, quand elle passe entre nous et le Soleil, arrive aux $\frac{2}{7}$ de cette distance [1]. Les rapprochements peuvent devenir encore plus sensibles, si l'on choisit l'opposition de Mars en périhélie pendant que la Terre est en aphélie, et la conjonction de Vénus aphélie avec la Terre périhélie. Si donc on détermine la distance de l'une de ces deux planètes dans ces conditions, il est facile d'en déduire celle du Soleil par la proportion tirée de la loi de Kepler.

Cassini à Bologne tenta de déterminer la parallaxe de Mars par le moyen des angles horaires, et en tira pour la parallaxe du Soleil le nombre de 12 secondes. C'était déjà un grand pas, mais ce résultat n'était pas assez sûr encore. L'Académie des Sciences de Paris ayant appelé Cassini dans son sein et décidé d'envoyer Richer à Cayenne pour des recherches astronomiques, Cassini insista pour que Richer fût chargé aussi d'observer Mars durant l'opposition de 1672, pendant que lui et les autres astronomes l'observeraient en Europe. Les observations faites par Richer près de l'équateur, comparées à celles des astronomes européens, donnèrent pour la parallaxe de Mars 25 secondes $\frac{1}{8}$; d'où se déduisait celle du Soleil égale à 9 secondes $\frac{1}{2}$. Ce résultat s'accordait assez bien avec celui des observations faites par Cassini seul; mais, comme il ne s'accordait pas avec ceux des autres astronomes, on resta encore dans l'incertitude sur la véritable valeur de la parallaxe solaire. Des observations faites dans les années postérieures par Maraldi, Pound et Bradley donnaient des parallaxes comprises entre 9 et 12 secondes. En 1751, La Caille entreprit

---

[1] La distance moyenne de la Terre au Soleil en kilomètres est 147 467 000; Mars en opposition arrive en moyenne à 77 056 000 kilomètres et Vénus à 40 709 000 kilomètres de la Terre.

un voyage au Cap de Bonne-Espérance pour y faire des observations astronomiques, et s'occupa de Mars pendant l'opposition du mois d'octobre de cette année. La comparaison de ses observations avec celles faites en Europe donna 26″,8 pour la parallaxe de Mars, et 10″,2 pour celle du Soleil.

Pour bien faire comprendre comment ces observations pouvaient donner lieu à des incertitudes, il faut exposer avec quelque détail la manière dont se font les mesures. La route de Mars sur la sphère céleste est d'abord tracée à l'aide des Tables de la planète; on sait ainsi quelles seront les étoiles

Fig. 233.



dont il s'approchera à l'époque la plus favorable. Le rôle de l'observateur se borne à mesurer la distance de la planète à ces étoiles, soit en déclinaison, soit en position et distance; mais cette opération, qui paraît si simple, n'est pas déjà si facile. Remarquons d'abord que, si, pour un observateur, Mars est éloigné d'une étoile *a* de l'arc M*a* (*fig.* 233), pour un autre ce sera de l'arc M′*a*, et il faut déterminer exactement ces deux arcs pour en avoir la différence. Or cette mesure offre de grandes difficultés : d'abord Mars a un disque assez large, et l'observateur ne peut pas pointer avec précision au centre; il est donc obligé de prendre la distance de l'étoile au bord de la planète, d'en mesurer le diamètre et de retrancher la moitié de ce dernier de la distance observée. Or

ce bord est sujet à des jeux de lumière, provenant des défauts de la lunette, de l'épaisseur des fils, etc., toutes causes d'erreurs qu'augmente encore la faiblesse de la lumière de Mars au bord, qui a pour cause l'absorption de son atmosphère : de là des appréciations très-différentes selon la force des instruments. Rien n'est plus difficile que d'amener un fil à être exactement tangent à un bord planétaire. L'oscillation de l'air, la distance parfois incommode de l'étoile, la différence de réfraction, sont encore autant de sources d'erreurs, qui étaient très-considérables surtout à l'époque dont nous parlons, où les lunettes étaient très-faibles et non achromatiques. De plus l'étoile ne se trouve pas toujours dans la position favorable comme en *a*, mais à droite ou à gauche de cette position comme en *b*, et alors il faut une attention particulière pour déterminer la différence de hauteur. Ajoutons que Mars se déplace continuellement, et il faut corriger de ce mouvement la position observée, si les observations ne sont pas rigoureusement simultanées. Il ne faut donc pas s'étonner si les mesures obtenues par ce procédé donnent des résultats discordants. Les observations de Mars sont très-importantes, et elles ont été reprises à notre époque, surtout dans les années où Mars s'est beaucoup approché de la Terre, la planète étant au périhélie, tandis que la Terre était à l'aphélie; le résultat fourni par les observations faites en Europe d'une part et de l'autre en Afrique et en Amérique a été 8″,94; il a contribué (comme nous le verrons) à rectifier la valeur de la parallaxe acceptée dans la première moitié de ce siècle sur la foi des calculs d'Encke.

Pour éviter les difficultés tenant aux mesures du diamètre de la planète, M. Galle a proposé de faire les observations sur Flora, laquelle, si elle n'arrive pas aussi près de nous que Mars, s'approche cependant à une distance à peine supé-

rieure à celle du Soleil [1], de sorte qu'elle peut fournir une valeur de la parallaxe, sinon agrandie, au moins plus sûre, comme exempte de l'erreur qui dépend du diamètre du disque; car, ce dernier étant très-petit, on peut en apprécier le centre avec précision. Les observations faites en 1874 ont donné la parallaxe 8″,873 [2]; à cette valeur correspond une distance du Soleil égale à 23245 rayons terrestres

§ III. — *Parallaxe solaire conclue des observations de Vénus.*

La planète Vénus peut être traitée comme Mars, lorsqu'elle est à sa conjonction inférieure, car quelquefois sa distance au Soleil en latitude est assez considérable pour la rendre visible même dans le moment de la conjonction. Mais, dans ce cas, nous n'avons pas l'avantage de pouvoir rapporter la planète aux étoiles; à cause de la phase alors très-mince, elle demande des corrections nombreuses, et il faut se contenter des distances zénithales absolues. On pourrait la rapporter au Soleil; mais, comme la parallaxe agit aussi sur cet astre, il ne reste que la différence, qui est égale aux $\frac{7}{3}$ de la parallaxe solaire. Cependant La Caille et ses contemporains ont employé cette méthode, et en ont conclu une parallaxe solaire de 10″,38. Cette valeur n'était pas très-éloignée de celle obtenue par Mars; elle était cependant encore trop forte, comme nous le verrons bientôt, ce qui tenait aux difficultés des observations faites avec les lunettes imparfaites de l'époque.

---

(1) En moyenne, elle s'approche de la Terre jusqu'à 176775000 kilomètres, mais elle arrive plus près de nous dans son perihélie.

(2) *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXXIX, p. 1361.

On peut encore se servir de Vénus d'une autre manière. Comme cette planète s'interpose quelquefois entre nous et le Soleil, de manière à se projeter sur son disque, on peut mesurer ses distances au bord du Soleil de deux stations éloignées l'une de l'autre, tout comme on mesure la distance de Mars à une étoile. Ce procédé est bon, mais il nécessite l'emploi des mesures micrométriques, qui sont toujours plus ou moins inexactes. On l'a appliqué sur une large échelle lors du dernier passage; les résultats ne sont pas encore connus.

Ce fut un Anglais, le célèbre Halley, qui apprit aux astronomes la véritable manière de se servir de cette planète pour obtenir la parallaxe solaire, par une méthode qui dispense de l'usage des micromètres pour mesurer les distances, et des autres moyens sujets à des incertitudes plus ou moins considérables. Avec cette méthode, il suffit d'avoir un bon chronomètre et une bonne lunette, et 1 seconde d'arc de la parallaxe est donnée par environ 3 minutes de temps; de sorte que cette parallaxe se déduit d'une quantité notablement plus grande qu'elle, et plus facile à déterminer.

La méthode de Halley consiste à observer le temps que la planète emploie à traverser le disque solaire, lorsque, étant dans sa conjonction inférieure, elle vient à être projetée sur le Soleil. Quand cela arrive, Vénus paraît sur le disque comme une tache noire d'un diamètre d'environ une minute d'arc, laquelle se détache admirablement sur le fond brillant de l'astre, et l'on peut prendre l'entrée et la sortie avec une grande précision. Seulement ces passages sont assez rares, car ils ne se présentent que deux fois dans l'espace d'un siècle. Deux passages successifs sont d'abord séparés par un intervalle de 105 ans; puis il y a un nouveau passage 8 ans après; ensuite il s'écoule 122 ans avant qu'il y ait un autre passage, et un second se présente encore 8 ans après ce dernier.

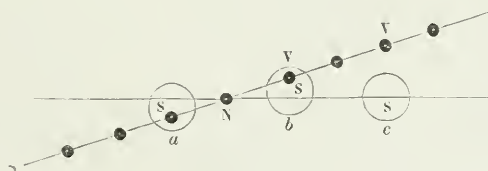
Voici la liste des passages de Vénus depuis le premier qui ait été observé :

Dates.	Années.	Côté du disque traversé.
4 décembre	1639	A
6 juin	1761	A
3 juin	1769	B
9 décembre	1874	B
6 décembre	1882	A
8 juin	2004	A
5 juin	2012	B

Cette rareté du phénomène, au lieu de décourager les astronomes, fut pour eux un motif qui les poussait à redoubler de zèle et d'activité, et l'histoire de la Science est pleine des préparatifs qui ont été faits et des expéditions qui ont été entreprises, afin de profiter de ces passages pour la solution du grand problème.

Les considérations suivantes serviront à faire mieux comprendre les circonstances de ce phénomène. Si Vénus et la

Fig. 234.



Terre circulaient autour du Soleil dans un même plan, la première passerait au devant du Soleil à chaque révolution synodique, c'est-à-dire à chaque conjonction inférieure. Mais, le plan de l'orbite de Vénus étant incliné de 3°23′31″ sur celui de la Terre, le passage ne peut être visible que lorsque les planètes se trouvent ou sur la même ligne dans le nœud N (*fig.* 234) ou du moins si près du nœud, que la distance VS ne

surpasse pas la somme des demi-diamètres du Soleil et de Vénus, c'est-à-dire 15′32″, sans quoi Vénus vue de la Terre resterait en dehors du disque solaire.

Or, si l'un de ces passages a lieu, par exemple en *a*, au-dessous du nœud, le passage suivant ne pourra arriver que de l'autre côté en *b*, au-dessus du nœud, après 8 ans : c'est l'intervalle le plus court qui puisse de nouveau amener les deux planètes sur la même ligne passant par le Soleil. Après ces deux passages accouplés, les conjonctions de Vénus auront lieu dans des positions telles que *c*, où la planète passe notablement au-dessus du disque solaire ; on ne pourra donc espérer de les revoir que près du nœud descendant, c'est-à-dire après plus d'un siècle, l'intervalle étant de 105 ou de 122 années, selon la position de l'aphélie de Vénus et de la Terre.

Nous avons donné plus haut la liste des passages qui ont eu lieu depuis la renaissance de l'Astronomie. Le premier, celui de 1639, ne fut vu que par Horrox et Crabtree, en Angleterre, qui ne surent en tirer aucun parti ; le second, en 1761, fut observé avec profit par les soins de l'Académie des Sciences, mais le passage ne se présentait pas dans des circonstances très-favorables ; on en tira pour la parallaxe des valeurs comprises entre 8″,86 et 10″,25, et il fallut ajourner la solution définitive jusqu'au passage de 1769, qui fut observé avec plus de succès. Enfin on a observé celui de 1874, dont nous attendons les résultats ([1]).

Voyons maintenant comment ces passages peuvent servir à déterminer la parallaxe du Soleil.

Soient T, V, S (*fig.* 235) les centres de la Terre, de Vénus

([1]) Pour l'histoire de ces passages et le détail des calculs, on peut consulter le Mémoire de M. Delaunay, publié en 1874 par l'Académie des Sciences avec d'autres documents concernant le même sujet (*Mémoires de l'Institut*, t. XLI).

et du Soleil, et soient en A et B deux observateurs, aussi éloignés que possible. Il est évident que l'observateur A verra Vénus en *a*, tandis que l'observateur B la verra en *b*, et que dans son passage la planète tracera pour le premier la corde *aa'*, et pour l'autre la corde *bb'*. La distance de ces deux

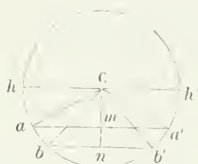
Fig. 235.



cordes sera fonction de la parallaxe, car un observateur au centre de la Terre aurait vu la planète suivre la corde *cc'*.

En réalité, les cordes sont très-voisines, mais assez excentriques, de sorte que leur déplacement produit une différence

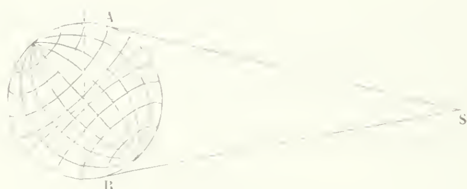
Fig. 236.



de longueur sensible, et par là une grande différence dans le temps du passage. Par les Tables du mouvement de Vénus, on connaît le temps qu'elle emploie à traverser le disque centralement sur le diamètre *hh'*. Par l'observation, on a celui qu'elle a employé à parcourir les cordes *aa'* (*fig.* 236) et *bb'*: on peut calculer la longueur des deux cordes en parties du demi-diamètre solaire, et en conclure la distance *mn* qui est la mesure de la différence de parallaxe entre Vénus et le Soleil. Nous avons supposé ici les observateurs A, B pla-

ces tous deux du même côté du méridien; mais il y a une circonstance heureuse qui *quelquefois* permet d'augmenter considérablement la différence de durée des passages. Les nœuds de l'orbite de Vénus tombant assez près des signes du Cancer et du Capricorne, les passages arrivent toujours dans les mois de juin ou de décembre. La position de la Terre est alors celle indiquée dans la *fig.* 237, et une de ses calottes polaires est tournée vers le Soleil, de sorte que l'observateur B se trouve du côté opposé du méridien qu'occupe l'observateur A, les deux ayant le pôle entre eux. Dès lors,

Fig. 237.



si en A la rotation diurne marche dans le sens même du mouvement de Vénus dans le ciel, en B elle marchera en sens contraire, et de cette manière, si pour l'un le passage est prolongé, pour l'autre il sera abrégé. Cette différence contribue à faire varier la durée des passages et à exagérer la quantité qui fournit la mesure de la parallaxe. C'est précisément ce qui arriva en 1769. Pendant que les observateurs en Californie et à Honolulu étaient du côté A, le P. Hell était en Laponie, à Wardhous, du côté B, et tandis que, pour ce dernier, l'astre allait se coucher, pour les premiers il allait se lever, exagérant ainsi les parallaxes en sens contraire. Le P. Hell put observer l'entrée le soir, avant le coucher, et la sortie le matin suivant, après le lever de Vénus. La durée de ce passage fut de plusieurs heures, et la

différence dans les stations opposées atteignit 27 minutes, c'est-à-dire 3 minutes pour 1 seconde de parallaxe !

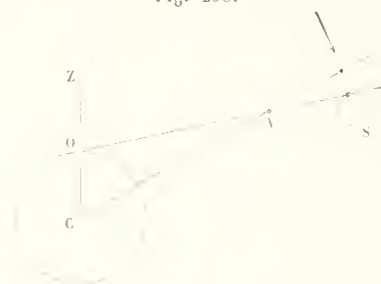
On voit quel immense avantage présente la méthode de Halley, qui se réduit à une détermination très-simple du temps d'entrée et de sortie sans autre peine que de bien régler la montre. Cependant toute médaille a son revers, et il en est ainsi dans ce cas.

On comprend, en effet, qu'une condition absolue de succès, c'est que l'entrée et la sortie de la planète soient observées à la même station ; que l'une des deux observations rate, et l'expédition est manquée. Or qui peut garantir un succès aussi complet ? Ajoutons que les stations où l'on peut voir les deux phases ne sont généralement pas nombreuses sur le globe terrestre, qui ne permet point aux observateurs de s'établir partout, tandis que les régions où l'on peut voir l'une ou l'autre des deux phases sont bien plus nombreuses : mais celles-ci étaient inutiles dans la méthode de Halley.

Ce fut un Français, l'astronome Delisle, qui imagina une méthode où ces stations sont utilisées, mais à une condition que n'exige pas la méthode de Halley, celle de connaître la longitude géographique des stations avec une précision absolue. Cette condition, qui pouvait présenter quelque difficulté au temps de Delisle, est maintenant bien secondaire, et la difficulté va disparaître de plus en plus. Pour bien comprendre les avantages de cette méthode, considérons la *fig.* 238. Soient O l'observateur, C le centre de la Terre, V Vénus, S le Soleil, vu au couchant. Comme la parallaxe abaisse Vénus, et que la planète traverse le Soleil en allant du bord oriental au bord occidental, l'observateur en O verra Vénus empiéter sur le bord solaire avant l'observateur supposé en C. L'*entrée* sera donc *accélérée*. De même dans la *fig.* 239, où le Soleil est vu au levant, Vénus ne sortira pour

l'observateur O qu'après qu'elle sera déjà sortie pour l'observateur C; ainsi la *sortie* sera *retardée*, et toute la durée *allongée* dans la combinaison de ces deux stations. Supposons maintenant une autre station placée de telle sorte que l'entrée

Fig. 238.



ait lieu au levant (*fig.* 240) : par l'effet de la parallaxe, l'*entrée* sera *retardée* sur celle qui serait vue du centre; enfin il y aura une station (*fig.* 241), où la *sortie*, observée au

Fig. 239.



couchant, sera *accélérée* par la dépression parallactique, et, pour cette combinaison, la durée du passage sera *raccourcie*

Il est évident que, ces combinaisons étant faites avec plusieurs stations éloignées, pour calculer la durée accélérée ou raccourcie du passage, il faut réduire le temps d'une station au temps local de l'autre, de là la nécessité de connaître leurs longitudes; mais il est clair qu'on pourra utiliser ainsi

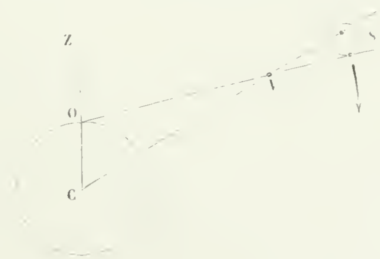
un grand nombre de stations qui seraient perdues pour la méthode de Halley, et de plus on pourra encore profiter des stations choisies pour cette dernière méthode, surtout dans le cas où les nuages empêcheraient l'observation de l'une des deux phases.

Fig. 240.



Pour trouver les lieux où les phases seront visibles, on n'a qu'à recourir aux méthodes que les astronomes emploient pour les éclipses ordinaires.

Fig. 241.



Par les Tables, on pourra toujours calculer le moment exact de la conjonction de Vénus et du Soleil et par conséquent les moments de l'entrée et de la sortie pour un observateur placé au centre de la Terre. Connaissant, par exemple, l'heure de Paris pour l'entrée, on cherchera d'abord le lieu de la Terre qui aura le Soleil à son zénith à cet instant. Alors, disposant

un globe terrestre avec cette station au sommet, on aura sous les yeux toutes les stations qui auront le Soleil au-dessus de l'horizon et verront l'entrée; puis, connaissant l'heure de Paris pour la sortie, qui a lieu quelques heures plus tard, on cherchera encore le lieu qui aura alors le Soleil à son zénith, et l'on placera de nouveau le globe de manière que ce lieu en occupe le sommet : on aura ainsi immédiatement tous les points qui auront le Soleil sur l'horizon et verront la sortie. Les lieux qui seront sur l'horizon dans les deux positions du globe terrestre seront ceux qui verront à la fois l'entrée et la sortie, et pourront servir pour la méthode de Halley. On verra de même directement la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon d'une station quelconque au moment de l'entrée ou de la sortie. D'après ces données, on choisira les places les plus convenables pour l'observation par les deux méthodes; car il faut que le Soleil ne soit ni trop haut, ni trop bas sur l'horizon pour éviter les deux inconvénients de la petitesse de la parallaxe dans une position trop haute, et des réfractions et agitations irrégulières de l'air dans une position trop basse. C'est ainsi qu'on prépare un choix provisoire des stations; on achève ensuite de les préciser par des calculs plus rigoureux. On peut voir, dans le volume cité plus haut, les cartes dressées par M. Puiseux pour les passages de 1874 et de 1882 (*Mémoires de l'Institut*, t. XLI). Dans le dernier passage, la différence de durée pouvait arriver jusqu'à 30 minutes; mais toutes les stations n'étaient pas facilement accessibles, et de là une grande limitation dans le choix.

Il résulte de ce que nous venons de dire que la parallaxe de 9 secondes peut se trouver donnée par une durée de temps qui peut être de 27 à 30 minutes; de sorte que chaque seconde d'arc correspond à plus de 3 minutes de temps, et que, même en commettant une erreur de 10 secondes en temps, on

aurait un résultat exact à $\frac{1}{18}$ ou $\frac{1}{20}$ de seconde en arc, c'est-à-dire à 0",05. Mais tous les passages ne sont pas si favorables, et quelquefois on doit, dans le choix des stations, se contenter d'une différence de durée de 17 à 20 minutes seulement.

Cependant cette précision théorique peut difficilement être atteinte dans la pratique. D'abord le passage entier présente quatre contacts :

1° Le premier contact extérieur, lorsque la planète va empiéter sur le disque solaire (*fig.* 242, *a*) ;

2° Le premier contact intérieur, lorsque Vénus est tout entière entrée sur le disque (*fig.* 242, *b*) ;

Fig. 242.



3° Le second contact intérieur (*fig.* 242, *c*) lorsqu'elle va sortir ;

4° Le second contact extérieur, lorsqu'elle va quitter définitivement le disque solaire (*fig.* 242, *d*).

Or il est évident que de ces quatre contacts le deuxième et le troisième seuls sont utilisables, car le premier est invisible au moment où il arrive ; on ne peut apercevoir Vénus que lorsqu'elle est déjà entrée sur le Soleil. Cependant on a proposé d'employer le spectroscope pour guetter le moment où la chromosphère solaire est entamée, ce qui permettrait de saisir l'instant où Vénus empiète sur le disque ; mais avec le spectroscope ordinaire l'image du bord n'est jamais tranquille :

il se produit une diffusion de lumière assez sensible qui trouble la vue, et le contact ne se voit pas assez nettement. Pour remédier à cet inconvénient, nous avons proposé d'appliquer en avant de la fente un second prisme, qui produit une image solaire très-bien définie au foyer de la lunette spectroscopique [1]. Ce prisme peut être placé en avant de l'objectif de la grande lunette, mais il faut alors qu'il ait des dimensions considérables ; on peut le placer directement devant la fente de l'instrument, à une distance de $0^m,25$ environ de la fente. Si l'on emploie pour cela un prisme à vision directe, il faut que le mastic soit assez résistant pour ne pas fondre au Soleil ; mais, les contacts spectroscopiques ne pouvant être comparables aux observations ordinaires, on n'a profité de cet instrument que pour des recherches secondaires, comme nous verrons plus loin.

Le premier contact intérieur est de la plus grande importance. Ici on doit guetter l'instant où la continuité du bord solaire se rétablit par la fermeture de l'anneau lumineux qui termine l'échancrure faite par Vénus. C'est à cet instant précis qu'on doit considérer la planète comme entrée complétement sur le disque ; mais à cet instant, qui paraît si facile à saisir, se manifestent des phénomènes qui ont été souvent très-embarrassants pour l'observateur. Nous n'insisterons pas sur les ondulations de l'atmosphère, qui sont parfois très-gênantes, et qui laissent alors planer sur l'appréciation de ce phénomène délicat une incertitude d'une minute entière ; elles constituent déjà une source de divergences sensibles. Les distorsions que subit la planète si le Soleil est trop près de l'horizon font perdre le moment le plus précieux. La *fig.* 243

---

(1) *Voir* t. Ier, p. 233.

représente une de ces apparences observées en 1769; mais à part ces difficultés accidentelles, et qu'on peut éviter en choisissant une station où le Soleil est suffisamment élevé, il y a d'autres inconvénients qui ne sont pas moins sensibles.

Fig. 243.



Les observateurs de 1769 et surtout le P. Hell remarquèrent que, lorsque le bord de la planète était devenu tangent à la courbe générale du bord solaire (*fig.* 244), le cercle de lu-

Fig. 244.

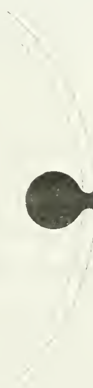
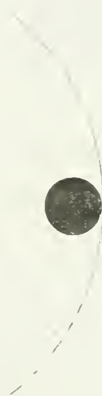


Fig. 245.



mière ne se fermait pas encore, mais que la planète avançait encore en laissant après elle une espèce de goutte noire attachée par un petit col au bord du Soleil (*fig.* 245). Après avoir atteint une certaine longueur, cette goutte se brisait tout à coup, et alors se produisait une sorte d'éclair (*fulmen* selon

l'expression du P. Hell) qui réunissait instantanément les deux bords de l'ouverture. On a beaucoup discuté sur la cause de cette apparence; l'opinion la plus probable l'attribue à une diffusion de l'image solaire qui serait due soit à l'irradiation, soit à l'imperfection des lunettes. Dans le passage de 1874, la plupart des observateurs n'ont rien vu de ce ligament noir, surtout ceux qui avaient des lunettes de grandes ouvertures et d'une perfection reconnue, et qui ont eu soin de bien mettre au foyer l'oculaire; cependant quelques-uns ont remarqué une sorte d'hésitation du cercle à se fermer. Une diffusion due, soit à l'irradiation, soit aux imperfections des instruments, pourrait bien produire cette apparence, comme nous avons déjà eu occasion de le dire (*voir* t. I[er], p. 315).

Il y a encore une autre cause d'incertitude qui, en 1874, a troublé le jugement des observateurs. Tout le monde sait que Vénus a une atmosphère assez sensible qui peut donner à la phase éclairée une étendue dépassant 180 degrés. Or Vénus étant dans la direction du Soleil aura le contour de son atmosphère fortement éclairé, et il en résultera comme un anneau de lumière réfractée tout autour de son disque. C'est là en effet ce que l'observation a montré. M. Janssen a pu apercevoir Vénus à une distance sensible du bord solaire avant l'entrée, en s'aidant de verres bleus absorbants, et M. Laymann l'a vue en se mettant à l'abri derrière des objets terrestres éloignés. D'autres ont vu le périmètre entier du disque lorsqu'il empiétait déjà en partie sur le Soleil (*fig.* 246). La couronne de lumière était assez vive pour surpasser l'intensité de la lumière de notre atmosphère, et c'est ainsi qu'elle devenait visible; mais cette lumière a quelque peu gêné les observateurs lorsque le bord ainsi éclairé arrivait au contact de la ligne circulaire du bord solaire, et que sa lumière se mêlait à la lumière du filet qui était sur le point de se fermer (*fig.* 247).

M. Mouchez, qui était à l'île Saint-Paul, a vu ce phénomène se produire nettement, et l'a trouvé assez gênant. Il résulte de là que l'œil est appelé à se prononcer sur des phénomènes très-compliqués qui se superposent et qui, étant inattendus, troublent le jugement de l'observateur. La vue plus ou moins perçante de l'observateur influe également sur l'instant où il notera l'apparition du filet, qui n'est pas instantanée, quoi-

Fig. 246.

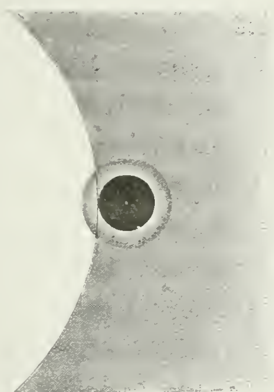
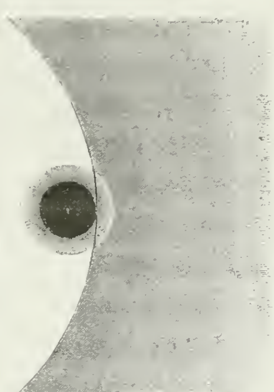


Fig. 247.



qu'elle le semble ; car nous savons que le bord solaire est très-diffus, et, selon les observateurs, il faudra que l'astre soit plus ou moins *entré* pour que la lumière ait une intensité suffisante pour ébranler leur rétine. Il ne faut pas non plus oublier que le Soleil n'a pas la même intensité lumineuse sur tout son contour, et que cela peut amener des différences dans l'appréciation de cet instant. Enfin, si nous réfléchissons à la lenteur du mouvement de Vénus, qui employait seize secondes de temps (¹) à parcourir une seconde en arc, nous ne serons pas étonnés de rencontrer des divergences de 10 se-

(¹) Ce nombre de seize secondes est celui que donne M. Tacchini, p. 96 de son Rapport.

condes et même 20 secondes dans les instants des entrées et pareillement dans ceux des sorties. Ces différences se produisent aussi dans les passages de Mercure, quoique cette planète ait un mouvement plus rapide.

Quant aux deux derniers contacts, il n'y a qu'à répéter ce que nous venons de dire des deux premiers. Dans le troisième, la rupture du filet donne lieu aux mêmes difficultés que sa fermeture. Pour la sortie finale, l'observation est extrêmement incertaine, car les fluctuations dues aux trépidations de l'air se confondent avec la petite échancrure due à la planète. Ici encore on peut recourir à l'emploi du spectroscope, en tenant compte des remarques que nous avons faites pour le premier contact.

Malgré ces difficultés pratiques, la méthode des passages n'en est pas moins la meilleure pour obtenir la parallaxe. C'est pour cela que les gouvernements ont toujours lutté de générosité pour organiser de nombreuses expéditions lointaines et pour envoyer leurs astronomes dans des stations convenablement choisies. A l'occasion du passage de 1874, la France a envoyé cinq expéditions, la première au Japon, sous la direction de M. Janssen, la seconde à Pékin, sous la conduite de M. Fleuriais, une autre dans l'hémisphère austral, à l'île Saint-Paul, ayant à sa tête M. Mouchez, et une quatrième à Nouméa, sous les ordres de M. André ; une cinquième, envoyée à l'île Campbell, a joué de malheur et n'a rien vu. Tous les observateurs étaient munis de lunettes à mouvement équatorial de 6 à 8 pouces, d'instruments des passages, d'altazimuts, de pendules, chronomètres, etc. L'Angleterre a envoyé également trois expéditions, dont la principale était celle de l'île Kerguelen, placée sous la direction du R. P. Perry, les deux autres sont allées aux Indes et à Honolulu. La Russie avait établi dix-neuf stations dans la Sibérie. Les États-Unis

avaient organisé trois ou quatre expéditions, l'Allemagne autant, l'Italie une. Nous ne parlons pas des astronomes qui ont fait à leurs frais ces longs voyages, ni des grandes entreprises comme celle de lord Lindsay, qui à lui seul a érigé à l'île Maurice un observatoire complet avec quatre grands instruments et cinquante chronomètres pour déterminer la différence des longitudes des diverses îles. L'expédition du P. Perry est demeurée trois mois à l'île Kerguelen pour fixer exactement la longitude de cette station, qui joue un rôle très-important dans l'observation du passage.

Les résultats de toutes ces expéditions ne sont pas encore connus. Des comparaisons provisoires entre Saint-Paul et Pékin ont donné à M. Puiseux 8″.879; M. André a trouvé pour deux autres stations 8″,88, M. Turquet, 8″.82, de sorte que l'incertitude paraît renfermée dans les centièmes. Mais les résultats définitifs ne seront connus qu'assez tard, car la plupart des observations ont été faites par la méthode de Delisle; celle de Halley a réussi à peine à Kerguelen et dans une ou deux autres stations. Pour le calcul définitif, il faut non-seulement avoir le temps local, ce qui demande déjà de longues réductions, mais encore les longitudes des stations, ce qui nécessite la réduction d'un bien plus grand nombre d'observations lunaires et chronométriques. A Kerguelen, station très-importante, il n'y a pas eu moins d'une centaine de culminations lunaires à réduire avec de nombreuses positions de la Lune en azimut, etc.

Cependant les observations publiées jusqu'ici montrent un grand accord. Ainsi les Italiens trouvent l'écart maximum, entre trois observateurs, de 6 secondes seulement. Pour d'autres stations, les différences sont encore plus petites. Si toutes les observations montrent cette précision, la parallaxe sera sûre à $\frac{1}{40}$ de seconde près.

Les expéditions de 1874 se proposaient encore de faire des mesures des distances de Vénus au bord solaire, soit avec les micromètres filaires et à double image, soit avec les héliomètres, comme aussi de mesurer la distance des pointes des segments et celle des cornes des échancrures de Vénus lorsqu'elle serait partiellement sur le disque. Ces observations auront sans doute leur utilité. Enfin on avait deux importantes nouveautés à essayer : l'une était la Photographie, l'autre le spectroscope. Des résultats des observations photographiques, on ne sait rien encore de positif. On sait seulement que des épreuves ont été obtenues par centaines en plusieurs stations. M. Janssen, avec son « revolver photographique », a pu prendre successivement et sur la même plaque de nombreuses photographies, et il y en a quelques-unes où l'impression de l'entrée est sûre à quelques secondes de temps près. Cependant on n'espère pas beaucoup de ce moyen. C'est un fait que nous avons constaté depuis longtemps et qui a été dernièrement confirmé par M. Angot, que le Soleil, en Photographie, a un diamètre très-différent selon la durée de l'exposition. De nos recherches il résulte que la différence peut monter à une minute d'arc ! De plus, les images qui ont été obtenues avec les appareils qui grossissaient par l'oculaire étant toutes déformées, il faudra toute une étude préliminaire pour en déterminer la correction rigoureuse. Peut-être ne pourra-t-on tirer un avantage sérieux que des épreuves qui ont été obtenues avec des objectifs à long foyer donnant des images directes de grandeur considérable. La réduction de ces observations sera donc une grosse besogne ; mais, quel que soit le résultat, on reconnaîtra au moins si la Photographie mérite d'être employée en 1882.

Quant au spectroscope, il a été employé seulement par M. Tacchini et M. Abetti, qui observaient à Maddapoor,

dans le Bengale, en société avec d'autres astronomes italiens munis de lunettes ordinaires. Le résultat le plus frappant a été que la sortie (car l'entrée fut perdue par des nuages) a été observée $2^m\,11^s,54$ plus tôt au spectroscope qu'aux lunettes ordinaires, ce qui, en réduisant la valeur du temps en arc, correspond à une diminution du diamètre solaire, vu au spectroscope, de $4'',83$. Ce résultat s'accorde avec ce que nous avons trouvé par des observations directes.

Les passages de Mercure sont plus fréquents que ceux de Vénus, mais on n'en tire pas le même parti, car la parallaxe déplace la planète presque autant que le Soleil, et il ne reste qu'une parallaxe différentielle très-petite, qui est fortement affectée par les erreurs d'observation.

Nous terminerons ce Chapitre en rapportant les parallaxes solaires conclues des passages les plus dignes de confiance et des calculs les plus soignés.

Par le passage de Vénus de 1769.

ANCIENNES RÉDUCTIONS.

Lalande	$8'',50$
Hell	8,70
Hornsby	8,78
Euler	8,82
Pingré	8,88
Encke	8,578

NOUVELLES RÉDUCTIONS.

Powalky	8,916
Stone	8,91

Par d'autres théories.

Le Verrier	8,95
Hansen	8,916

Par les oppositions des planètes supérieures.

MARS.

Winnecke	8,95
Stone	8,943

FLORA.

Galle	8,873

La moyenne des déterminations modernes est 8″,922; à cette parallaxe correspond une distance du Soleil égale à 23125 rayons terrestres, et en prenant le rayon terrestre égal à 6377398 mètres, on trouve pour cette distance 147467000 kilomètres.

Avant les dernières recherches, la parallaxe acceptée était celle de Encke (8″,578); mais Hansen et Le Verrier reconnurent qu'elle était trop petite et qu'il fallait la porter à 8″,91; en conséquence, on a diminué la distance du Soleil d'environ $\frac{1}{30}$. Cette différence d'environ 5 millions de kilomètres ne représente pourtant, en parallaxe, que l'épaisseur d'un cheveu vu à la distance de 40 mètres. La divergence des résultats venait principalement du choix des observations fait par les calculateurs et du peu de confiance qu'on avait dans celles du P. Hell, qu'on soupçonnait d'avoir été arrangées après coup. Ce soupçon a été propagé par Lalande, qui, n'ayant pu obtenir du P. Hell les observations immédiatement, comme il le désirait, formula contre l'observateur cette odieuse insinuation. Mais Delambre assure que le retard avait pour motif les ordres reçus par l'astronome du gouvernement danois de ne communiquer ses chiffres que par la voie officielle. Du reste, les feuilles originales du registre de Hell, retrouvées par M. de Littrow, montrent bien quelques corrections, mais insignifiantes, et il est prouvé qu'elles furent écrites sur

place. Comme cette observation, si on l'emploie, conduit au résultat actuellement reçu, la réputation de son auteur se trouve justifiée (¹).

§ IV. — *Confirmations de la nouvelle valeur de la parallaxe solaire.*

Outre les moyens directs, on a, pour déterminer la distance du Soleil, des moyens indirects qui peuvent servir à la contrôler.

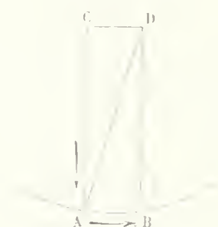
La première vérification est fournie par la mesure de la vitesse de la lumière. Cette quantité ne pouvait autrefois se déterminer que par les observations astronomiques, la rapidité avec laquelle se propage la lumière étant telle que toute distance terrestre est parcourue dans un instant imperceptible. Mais les physiciens Foucault et Fizeau ayant trouvé récemment le moyen de déterminer cette vitessse avec des distances mesurables sur la Terre, on a pu en conclure la distance du Soleil. Par les observations des satellites de Jupiter, on sait que la lumière emploie $8^m 17^s,8 = 497^s,8$ pour arriver du Soleil à la Terre, à sa distance moyenne. La vitesse de propagation de la lumière fut trouvée par M. Fizeau, en 1842, de 315000 kilomètres, par Léon Foucault, en 1862, de 298000 kilomètres, et par M. Cornu, en 1875, de 300400 kilomètres par seconde. En prenant comme le plus exact le résultat de M. Cornu, il s'ensuit pour la distance du Soleil le chiffre de 148 millions de kilomètres, qui s'accorde avec celui trouvé plus haut, et une parallaxe de 8″,86.

Une autre confirmation de ces résultats se tire du déplace-

(¹) *Voir* Delambre, *Histoire de l'Astronomie au* XVIIIe *siècle*, p. 556.

ment apparent des étoiles, qu'on appelle *aberration*. L'observateur étant en mouvement autour du Soleil, sa vitesse de translation AB (*fig.* 248) dans l'orbite se compose avec le mouvement de la lumière CA, et il en résulte une déviation dans la direction apparente des étoiles suivant la diagonale AD. Cette déviation est évaluée à 20″,42 par les meilleures observations. On connaît donc le côté AC, ou la vitesse de la lumière dans une seconde, par les expériences rapportées ci-dessus, et l'angle CAD, qui est mesuré par l'observation astronomique. On peut dès lors calculer l'arc AB et de là remonter au rayon de l'orbite dont il fait partie. La valeur

Fig. 248.



du rayon de l'orbite terrestre qu'on trouve ainsi conduit à la parallaxe donnée ci-dessus.

Ces deux déterminations ne peuvent avoir le même poids que l'observation directe des déplacements parallactiques des planètes, car les sources d'erreur, inévitables dans la mesure de la vitesse de la lumière, sont encore trop nombreuses pour en tenir compte exactement. Cependant il y a là une éclatante confirmation des résultats obtenus par les méthodes directes.

On peut dire la même chose des valeurs de la parallaxe déduite des mouvements de la Lune et des inégalités planétaires. Le calcul des perturbations, comme les appellent les astronomes, avait fait reconnaître la nécessité de rapprocher

la Terre du Soleil, et la valeur qui satisfaisait le mieux à la théorie était, d'après Hansen et Le Verrier, 8″,91. On pouvait ainsi corriger la parallaxe de Encke en lui substituant celle de ces deux astronomes. Toutefois on ne saurait considérer cette détermination nouvelle comme rigoureuse et directe; car le nombre des perturbations et celui des inconnues qui entrent dans les calculs est très-grand, et, quoique la Mécanique céleste soit très-avancée, ses théories ne donnent pas la certitude absolue que la correction de la parallaxe soit le seul moyen de satisfaire aux observations. Par conséquent, si ces résultats sont excellents pour confirmer la nouvelle valeur de la parallaxe, on ne saurait se flatter de fonder sur eux seulement la détermination définitive de la distance du Soleil à la Terre.

Somme toute, nous pouvons être convaincus que la valeur de la parallaxe ne pourra plus subir de changement notable, et que la discussion définitive des observations du passage de 1874 réduira l'incertitude à quelques centièmes de seconde. Il est permis d'espérer que lors du prochain passage de 1882, en profitant de l'expérience acquise dans le dernier, on achèvera d'établir pour les astronomes futurs cet élément avec le degré de précision qui est nécessaire à la Science : ce sera un des plus beaux triomphes de notre génération



CHAPITRE III.

LE SOLEIL CENTRE DE FORCE. — GRAVITATION.

Le Soleil est le foyer autour duquel toutes les planètes décrivent leurs orbites. Il doit cette prérogative à sa masse considérable, masse qui est presque mille fois plus grande que celle de tous les astres qui lui servent de cortége ([1]). Nous exposerons ici les phénomènes planétaires qui sont intimement liés à la constitution du Soleil, sans cependant entrer dans les détails propres à un Traité de Cosmographie ou d'Astronomie. Pour ces détails, on peut consulter une foule d'Ouvrages spéciaux, parmi lesquels on nous permettra d'indiquer notre *Tableau physique du système solaire;* Rome, 1859.

§ I. — *Formation du système planétaire.*

Les savants sont de nos jours unanimes à admettre que notre système solaire est dû à la condensation d'une nébuleuse qui s'étendait autrefois au delà des limites occupées actuellement par les planètes les plus lointaines. Cette nébuleuse était primitivement douée d'un mouvement de rotation très-lent, qui devait s'accélérer plus tard. D'après une loi mécanique connue sous le nom de *loi des aires*, chaque particule

([1]) Selon M. Dunkin, les masses des planètes réunies seraient égales à 422 fois la masse de la Terre, et celle du Soleil seul serait égale à 315 000 fois la masse de la Terre, ce qui donne 746 pour le rapport de la masse du Soleil aux masses des planètes.

libre doit se mouvoir de manière que son rayon vecteur décrive des aires égales dans des temps égaux ; de là il suit que, le rayon diminuant constamment par la contraction progressive, l'arc décrit pendant l'unité de temps a dû s'accroître, afin que l'aire restât constante. De cet accroissement de vitesse il résulte une augmentation de la force centrifuge, et lorsque celle-ci est devenue égale à la force de gravitation, il s'est formé des anneaux qui sont demeurés librement suspendus autour de la masse centrale. Les anneaux ainsi formés ont continué d'agir l'un sur l'autre par leurs attractions mutuelles ; il en est résulté des perturbations d'autant plus grandes que la durée de leurs rotations était plus différente ; ils ont fini par se briser, et les différents fragments obéissant individuellement aux lois de l'attraction ont formé de nouvelles masses isolées les unes des autres, qui sont devenues des centres d'action semblables au centre principal. Ces masses, à leur tour, ont pu s'environner d'anneaux de second ordre, dont quelques-uns ont persisté jusqu'à nos jours, comme nous le voyons dans le système de Saturne, tandis que les autres, en se brisant, ont formé des satellites.

Cette théorie, proposée par Kant, Herschel et Laplace, a été étudiée dans ces derniers temps par MM. Hinrichs et Roche et confirmée par les ingénieuses expériences de M. Plateau. Une masse d'huile étant mise en suspension dans un liquide de même densité, formé d'un mélange d'eau et d'alcool, on la voit prendre spontanément la forme sphérique que tend à lui donner l'attraction moléculaire. Si on la fait tourner autour de son diamètre vertical avec une vitesse croissante, on voit d'abord la sphère s'aplatir ; puis il vient un moment où il se détache un anneau semblable à celui de Saturne ; enfin, la vitesse croissant toujours, un moment vient où l'anneau se brise, et il se forme de petites sphères qui

pivotent sur elles-mêmes en tournant autour de la masse principale. M. Roche vient de démontrer que, outre les anneaux extérieurs de Laplace, il peut aussi se former des anneaux intérieurs qui sont soumis à des lois particulières [1].

La matière qui composait la nébuleuse primitive devait être à un état de raréfaction beaucoup plus considérable que celui que nous obtenons avec les meilleures machines pneumatiques; elle s'est énormément contractée et condensée, laissant à différentes distances des planètes et des satellites; le Soleil est le résidu encore incandescent et gazéiforme de cette masse primitive. Nous retrouvons dans le monde sidéral des vestiges de cette formation; dans notre système planétaire, ce sont les anneaux qui environnent Saturne, et dans le monde stellaire, ce sont les nébuleuses spirales et les nébuleuses annulaires. Ces masses sont composées d'une matière encore gazeuse, et elles semblent constituer des mondes en voie de formation.

Il est impossible d'assigner actuellement les circonstances qui ont déterminé la formation de chaque planète; mais la loi qui règle leurs distances semble imprimer au système tout entier l'empreinte d'une formation graduelle, dans laquelle ces astres ont dû, chacun à leur tour, se détacher de la masse centrale.

Kepler est le premier qui découvrit une certaine régularité dans la distribution des planètes; il y avait cependant une anomalie dans la distance qui sépare Mars et Jupiter; aussi, en s'appuyant sur cette seule remarque, osa-t-il annoncer qu'on découvrirait plus tard dans cette région un

---

[1] M. Roche a fait connaître un grand nombre d'autres conclusions dont plusieurs avaient déjà été démontrées par M. Hinrichs. Nous les avons signalées dans la première édition de cet Ouvrage, en y ajoutant quelques remarques.

astre jusque-là inconnu. Il a fallu près de deux siècles pour que l'événement vînt lui donner raison; nous savons maintenant qu'au lieu d'une seule planète que Kepler avait en vue, il en existe au moins 168. Tous ces astres cependant tiennent simplement la place d'une seule planète, dont la masse, d'après les calculs de M. Le Verrier, est tout au plus égale au tiers de celle de la Terre. Cet état de division nous montre qu'à l'époque où se sont formées les petites planètes, il a dû exister une grande perturbation dans la masse solaire.

Après Kepler, Titius trouva une loi plus exacte pour exprimer les relations qui existent entre les distances des planètes au Soleil. Si nous appelons n le numéro d'ordre de la planète considérée, à partir de Vénus [1], la loi de Titius est contenue dans la formule suivante : $D = 4 + 3 \times 2^{n-1}$. Nous reproduisons ici un tableau comparatif des distances vraies, déduites de l'observation, et des distances approchées, calculées d'après la formule précédente; le lecteur pourra apprécier l'accord remarquable qui existe entre les deux séries de nombres.

PLANÈTES	DISTANCES VRAIES.	DISTANCES APPROCHÉES, d'après la loi de Titius.
Mercure	3,871	4
Vénus	7,233	7
La Terre	10,000	10
Mars	15,237	16
Petites planètes	22,0 — 31,6	28
Jupiter	52,028	52
Saturne	95,388	100
Uranus	191,826	196
Neptune	300,369	388

(1) Nous commençons par Vénus, car Mercure n'est contenu dans la formule que par exception, faisant le second terme égal à zéro. Neptune s'en éloigne aussi notablement. M. Roche a donné une loi plus approchée, mais plus complexe.

M. Hinrichs, en combinant les lois de Kepler avec l'hypothèse de la rotation primitive, a prouvé que la formule de Titius est la conséquence de la condensation progressive de la nébuleuse solaire, condensation qui a dù être régulière et proportionnelle au temps, de sorte que les nombres qui mesurent les distances des planètes mesureraient aussi le temps qui a séparé leur formation. Les différences, assez petites, du reste, que l'on trouve entre les nombres calculés d'après la théorie et ceux qu'on déduit de l'observation, peuvent facilement s'expliquer par la résistance de l'éther et par les influences perturbatrices que les planètes ont dù exercer les unes sur les autres après leur formation. La résistance de l'éther doit avoir été plus sensible sur les planètes les plus anciennes : c'est pour elles, en effet, qu'on observe les plus grandes différences. Les distances des satellites, dans les systèmes secondaires, sont également sujettes à une loi semblable ; mais ici encore les écarts sont plus considérables pour les planètes les plus anciennes.

M. Hinrichs arrive à une conclusion fort importante, c'est que la loi de la condensation progressive se trouve liée à la troisième loi de Kepler. La troisième loi de Kepler est elle-même une conséquence de la gravitation universelle agissant en raison directe des masses et en raison inverse du carré des distances. Ce grand principe, dû au génie de Newton, est en réalité un résumé des trois lois de Kepler dont nous rappelons ici l'énoncé : 1° les aires décrites par les rayons vecteurs sont proportionnelles au temps; 2° les orbites sont des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers ; 3° les carrés des durées de révolutions sont entre eux comme les cubes des grands axes. On le voit donc, la loi de la formation du système planétaire serait une simple conséquence de la gravitation universelle. M. Roche vient de confirmer

les résultats de M. Hinrichs en leur donnant plus d'extension.

Il est utile d'examiner avec quelques détails les circonstances principales de cette grande évolution. Nous avons déjà dit que l'existence des petites planètes semble correspondre à une période de perturbation. Cette hypothèse semble confirmée par un certain nombre de faits qu'elle servirait à expliquer.

1° Toutes les planètes extérieures à cette zone ont une densité très-faible, généralement inférieure à celle de l'eau; les autres, au contraire, ont un poids spécifique cinq fois plus grand que celui de l'eau.

2° L'espace occupé par les petites planètes est plus grand que celui qui sépare la Terre du Soleil; quelques-unes d'entre elles se rapprochent tellement de l'orbite de Mars, que cette planète semble, pour ainsi dire, faire suite à la série des astéroïdes, de sorte que sa formation aurait été influencée par cette grande cause de discontinuité.

3° Toutes les planètes extérieures ont un nombreux cortége de satellites : Jupiter en a quatre, Saturne huit, Uranus quatre, Neptune en possède au moins un; les autres sont trop difficiles à voir pour qu'on puisse regarder leur existence comme incontestable. Parmi les planètes les plus rapprochées du Soleil, la Terre est seule à posséder un satellite.

4° Les masses des planètes extérieures sont incomparablement plus grandes; la plus petite est à elle seule plus considérable que toutes les planètes intérieures réunies. Ce fait est dû, au moins en partie, à l'immense étendue dans laquelle était primitivement répartie la masse qui compose ces planètes.

5° On a découvert un fait très-important en étudiant au spectroscope la lumière réfléchie par leurs atmosphères. Les planètes extérieures montrent toutes pour la lumière solaire

une puissance considérable d'absorption élective. Jupiter présente dans le rouge une bande noire que nous ne retrouvons pas dans nos raies atmosphériques. Saturne possède la même bande, mais encore plus foncée. Le spectre d'Uranus a deux raies spéciales très-fortes dans le vert et le bleu, et une assez large dans le jaune. Le spectre de Neptune est encore plus singulier. Il présente trois bandes noires principales, la première entre le jaune et le vert, à égale distance des raies D et *b* du Soleil; la seconde coïncide avec la raie *b*; la troisième est située dans le bleu. Le jaune est assez brillant, mais le rouge est très-faible; le vert est assez abondant, ce qui explique la couleur verte que présente cette planète.

Ces planètes sont donc environnées d'atmosphères très-denses et très-étendues. L'existence de ces atmosphères se manifeste encore par des bandes dont elles sont sillonnées parallèlement à l'équateur. Jupiter présente dans son aspect des variations très-grandes et des phénomènes qui semblent avoir beaucoup d'analogie avec nos nuages et nos ouragans. Il est en outre sujet à des variations de couleur très-considérables, qui ont fait supposer des phénomènes analogues à nos aurores boréales; il paraît du moins certain que ces modifications ne peuvent se produire que dans une masse à l'état gazeux. Nous avons observé assidûment cette planète pendant vingt-quatre ans; nous avons acquis la conviction que ces bandes équatoriales éprouvent des variations continuelles qui semblent prouver que la masse entière se trouve encore à l'état de chaos. Au contraire, les planètes intérieures ont des atmosphères comparativement minces et transparentes, ce qui permet de distinguer les accidents que présente leur surface; les variations qu'elles présentent sont sans doute dues à des nuages, mais on n'y reconnaît que des substances analogues, par leur pouvoir absorbant, à celles de notre globe

terrestre. Ce n'est donc pas aller beaucoup au delà de ce que les faits semblent indiquer que de supposer les planètes extérieures à un état assez voisin de l'état nébuleux.

6° Les planètes extérieures ont une vitesse de rotation qui est, en moyenne, deux fois et demie plus considérable que celle des planètes intérieures : une différence aussi grande, et qui ne présente aucune transition, ne saurait être l'œuvre du hasard. M. Kirkwood a cherché une loi empirique qui reliât ensemble la masse des planètes, la durée de leur rotation et celle de leur révolution, et il est arrivé au résultat suivant. Considérons une planète quelconque ; supposons-la en conjonction avec la planète intérieure la plus voisine ; déterminons par le calcul le point où ces deux astres exercent des attractions égales, et appelons r la distance de ce point à la planète considérée. Faisons le même calcul relativement à la planète extérieure, et appelons r' la distance du nouveau point d'égale attraction. Posons $r + r' = D$. Il y aura ainsi, pour les différentes planètes, des quantités $D, D', D'', \ldots$, précises et déterminées. Appelons n le nombre des rotations sidérales que la planète considérée accomplit autour de son axe, pendant qu'elle exécute une révolution sidérale autour du Soleil. On trouve, d'après Kirkwood, $n^2 : n'^2 :: D^3 : D'^3$, ou bien $n = n'\left(\frac{D}{D'}\right)^{\frac{3}{2}}$, relation semblable à celle de la troisième loi de Kepler, qui relie les distances aux durées des révolutions. Cette relation suppose qu'il existe une planète unique entre Mars et Jupiter, en lui attribuant une masse à peu près égale à celle qui résulte des calculs de M. Le Verrier. L'astronome américain S. Ch. Walker a fait voir que cette relation est une conséquence de l'hypothèse nébulaire. Il ne faut pas se dissimuler que ce résultat dépend d'un grand nombre d'éléments peu certains, de sorte qu'on ne saurait, jusqu'à

présent, le regarder comme une loi de la nature; il constitue cependant un fait remarquable qui montre de plus en plus que toutes les masses qui composent le système solaire ont une origine commune.

Cette communauté d'origine est du reste constatée par un grand nombre de faits; contentons-nous de citer les plus saillants :

7° A. Dans toutes les planètes, et dans tous les satellites, le mouvement de translation et le mouvement de rotation ont lieu dans le même sens, qui est aussi celui de la rotation du Soleil. Cette direction ne peut être que celle du mouvement de la nébuleuse primitive.

B. Les planètes décrivent des orbites très-peu inclinées les unes sur les autres, si bien qu'on peut dire qu'elles sont presque comprises dans un même plan. Les seules exceptions se trouvent parmi les petites planètes entre Mars et Jupiter, c'est-à-dire dans la région précise de la grande perturbation.

C. Les orbites des principales planètes sont très-peu allongées. Quelques astéroïdes font exception à cette loi, mais leur masse est si petite qu'on peut n'en pas tenir compte; et d'ailleurs cette excentricité n'est probablement que l'effet de perturbations arrivées postérieurement à leur formation.

D. La masse centrale est prépondérante, et dépasse de beaucoup celles de tous les satellites. Ces différentes circonstances ne sont pas accidentelles, car c'est d'elles que dépend la stabilité du système tout entier.

E. Les orbites sont très-peu inclinées sur ce plan fondamental du système solaire découvert par Laplace, et qu'on appelle le *plan invariable*, parce qu'il reste constamment le même malgré les perturbations qui résultent des actions réciproques. Ce plan ne peut être que celui de la rotation primitive de la nébuleuse solaire.

Cette hypothèse nous explique donc une foule de circonstances qui sont intimement liées ensemble, et qu'on ne saurait expliquer autrement. La théorie de Newton relie entre eux les phénomènes principaux du système solaire, et les réduit au seul principe de la gravitation ; de même l'hypothèse nébulaire nous explique l'impulsion tangentielle et les circonstances physiques de second ordre que nous apercevons dans l'ensemble du système ([1]).

Pour mieux connaître le mécanisme du monde planétaire, nous devrions savoir quelles sont l'origine et la nature intime de cette force qui pousse les corps les uns vers les autres, et qu'on nomme attraction ou *gravitation*, parce que la chute des corps *graves* à la surface de la Terre n'est qu'un cas particulier de cette force ; mais nous ne pouvons rien dire de certain sur ce sujet. Les mathématiciens et les astronomes admettent cette gravitation comme un fait primitif capable d'expliquer les mouvements des corps célestes, et ils lui appliquent les formules de la Mécanique sans se préoccuper de son origine. Les physiciens s'en tiennent également là, et ils ne pensent pas que l'état de nos connaissances nous permette d'aller plus loin.

Cependant l'opinion la plus probable, celle qui tend à se répandre chaque jour davantage, attribue les phénomènes d'attraction à l'éther, ce fluide universel qui remplit le monde entier, et concourt avec la matière pondérable à la constitution de tous les corps. Mais en quoi consiste l'action de l'éther? On est loin d'être d'accord sur cette question. Ce qui est certain, c'est qu'il doit y avoir, entre le Soleil et les planètes, un

---

([1]) Ceux qui voudront plus de détails pourront consulter le Mémoire de M. Roche. Cependant plusieurs de ses conclusions sont bornées par la condition qu'il suppose nulle l'action de l'atmosphère par rapport au noyau principal.

moyen de communication de force et de transmission de mouvement, car l'action d'un corps sur l'autre à distance est impossible. Comme l'existence du milieu éthéré est parfaitement prouvée par les phénomènes lumineux, on ne voit pas qu'il soit nécessaire d'imaginer un autre intermédiaire pour la transmission des autres mouvements.

D'un autre côté, les expériences relatives à l'électricité nous montrent que tous les changements de densité dans ce fluide rendent les corps qui le contiennent capables d'exercer des attractions; on serait donc porté à croire que la gravitation elle-même pourrait bien être due à une pareille différence de densité dans le milieu éthéré qui environne le Soleil ou toute autre masse pondérable. Nous ne faisons qu'indiquer ici ces conjectures que nous avons exposées ailleurs ([1]). Du reste, l'action de ce milieu se présentera bientôt à nous comme produisant des phénomènes d'un autre ordre que l'attraction. Aussi devons-nous le regarder comme l'un des agents les plus importants de la création.

Nous allons maintenant passer rapidement en revue les corps qui composent le cortége du Soleil.

§ II. — *Les planètes.*

Le volume relatif des planètes et du Soleil est assez bien indiqué dans la *fig.* 249.

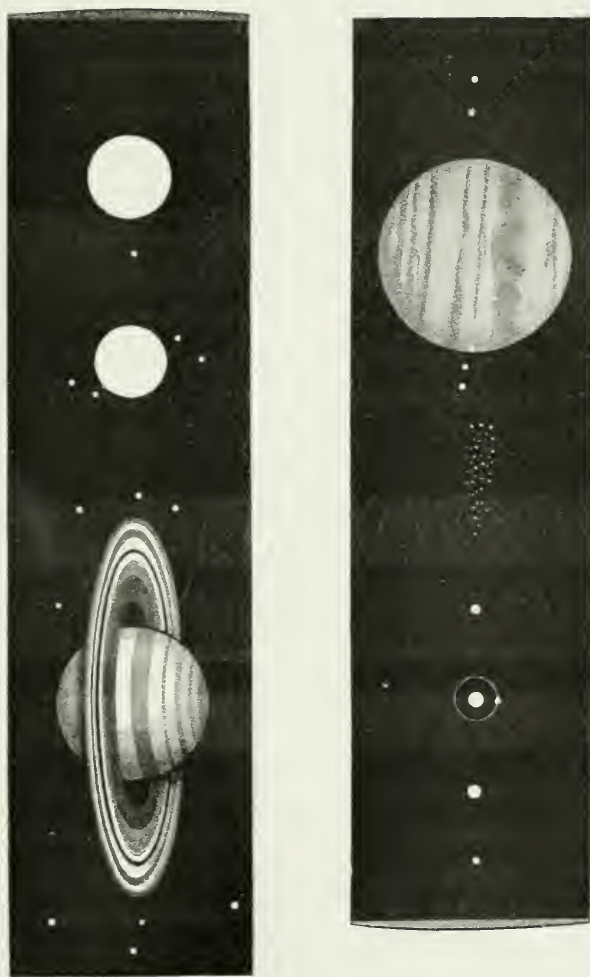
Les deux bandes noires de cette figure, mises bout à bout, donnent la dimension relative du diamètre solaire, de sorte que, pour représenter la grandeur proportionnelle de cet astre,

---

([1]) Voir l'*Unité des forces physiques*, Paris, 1869 et 1874, chez Savy, Livre IV.

il faudrait tracer un cercle ayant pour diamètre la longueur des deux bandes mises bout à bout. Les planètes sont figu-

Fig. 249.



rées à l'intérieur par des cercles proportionnels à leur vraie grandeur.

Nous avons déjà parlé des relations qui existent entre leurs

distances; nous nous contenterons d'indiquer ici, pour chacune d'elles, les détails les plus importants de leur constitution physique, qui pourront nous éclairer sur leur mode de formation.

Mercure. — Cette planète est la plus voisine du Soleil, et la plus petite de celles qui sont anciennement connues. C'est elle qui a la plus grande densité (6,84, en prenant celle de l'eau pour unité). Elle présente des taches très-sensibles, surtout auprès du bord intérieur du croissant où la lumière est plus faible, ce qui prouve qu'elle est environnée d'une atmosphère, et même cette atmosphère paraît plus dense que celle des planètes voisines. On y trouve des variations assez considérables, dues sans doute à des nuages. Cette planète est difficile à observer.

La durée de la rotation de Mercure est de $24^h 5^m 28^s$. L'intensité de la radiation solaire y est 6,69 fois plus forte que sur la Terre, mais l'excentricité de son orbite doit produire à sa surface de grandes variations de température. Comme il est presque toujours plongé dans les rayons du Soleil, on n'a pu l'examiner au spectroscope que près de l'horizon, position très-défavorable, et l'on n'a rien constaté de particulier dans son atmosphère. La durée de sa révolution est presque égale à 88 jours (87,97). Sa masse est 0,05, celle de la Terre étant prise pour unité.

Vénus. — Cette planète se trouve dans des conditions plus analogues à celles de la Terre; son volume est presque le même ; sa masse est 0,87 ; sa densité 5,10 ; l'intensité de la radiation solaire y est double de celle qu'éprouve la Terre. Mais, en revanche, l'axe de rotation étant, d'après le P. de Vico, incliné de 53°12′ sur le plan de l'orbite, l'arc diurne doit y être très-variable, et par conséquent les climats doivent présenter des extrêmes bien plus tranchés que chez

nous. L'année de Vénus est de $224^j,7$, et le temps de sa rotation de $24^h 21^m 21^s,9$. L'atmosphère de cette planète est assez grande pour produire un crépuscule très-sensible; nous avons même pu constater que la partie éclairée par ce crépuscule correspond à un arc de 18 degrés; voici dans quelles conditions nous avons pu faire cette remarque. La planète se trouvait en conjonction inférieure, et par suite son croissant était réduit à un filet très-mince. Malgré la finesse des pointes, nous avons pu reconnaître que ce croissant embrassait plus d'une demi-circonférence, et que, de part et d'autre, il dépassait de 18 degrés l'étendue qu'il aurait dû présenter sans le phénomène du crépuscule. Quelquefois même on a cru voir le disque éclairé dans toute son étendue, et l'on a aperçu d'autres lueurs qui pourraient bien être produites par des aurores boréales.

Le spectroscope nous apprend que l'atmosphère de Vénus a une composition analogue à celle de la Terre; elle contient en particulier de la vapeur d'eau produisant des nuages, et, en effet, outre les taches fixes, on en voit encore d'autres qui sont assez variables. Selon M. Nelson [1], l'atmosphère de Vénus aurait une réfraction horizontale de 54',65 et sa densité serait 1,89 fois celle de l'atmosphère terrestre.

La Terre. — Disons ici quelques mots de la Terre considérée comme corps céleste. Sa densité est égale à 5,5. Son rayon équatorial est de $6377^{km},398$. Vue du Soleil, elle sous-tend un angle de $17'',8$; son diamètre apparent est donc à cette distance égal à celui que nous offre Vénus à sa distance moyenne. Pour un spectateur placé en dehors d'elle, elle présenterait des taches constantes et des zones variables,

---

[1] *Monthly Notices R. Astr. Soc.*, t. XXXVI, p. 348.

les premières dues aux mers et aux continents, les secondes dues aux nuages. Il y aura deux zones sombres situées de part et d'autre de l'équateur, formées par les régions sereines et transparentes des vents alizés; entre elles et au delà se trouveraient des zones brillantes, plus ou moins interrompues, correspondant aux régions de nuages et de pluie des tropiques. Dans le voisinage des pôles, l'aspect serait très-variable suivant les saisons.

Les phénomènes géologiques et volcaniques nous prouvent que l'intérieur de la Terre est à une température très-élevée, reste de sa chaleur primitive. Cette température est telle que, d'après les appréciations les plus modérées, à une profondeur de quelques centaines de kilomètres, toutes les substances doivent être en fusion. Sa surface est composée de matières solides ayant un poids spécifique moins considérable; les plus lourdes se trouvent à une plus grande profondeur, et souvent, dans les mines, on les rencontre à un état qui prouve qu'elles ont été produites par sublimation. Sous ce rapport, nous trouvons quelque chose d'analogue avec la disposition des substances qui composent le Soleil. Du reste, la densité moyenne du globe est beaucoup plus grande que celle des matériaux qui constituent son écorce; il faut donc bien que l'intérieur contienne des substances ayant une densité plus considérable. M. Roche pense que, dans les couches les plus voisines du centre, la densité doit être onze ou douze fois plus grande que celle de l'eau. D'après lui, le noyau central ne serait pas doué d'une fluidité absolue: il n'y aurait qu'une couche liquide, située à une profondeur peu considérable, et dont la présence expliquerait les phénomènes volcaniques. La température plus élevée de la masse intérieure serait due, d'après M. Mallet, à la contraction produite par le refroidissement : la couche superficielle, diminuant de volume, comprime

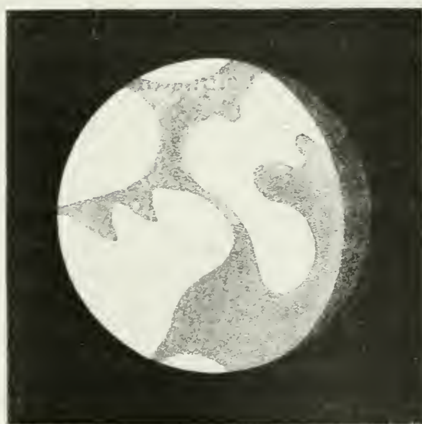
fortement les couches situées plus près du centre et développe ainsi une grande quantité de chaleur. Sous l'influence com-

Fig. 250.



binée de la pression, de la chaleur et des actions moléculaires,

Fig. 251.



la matière qui compose le noyau central doit se trouver à un état bien différent de l'état solide et de l'état liquide, tels que nous les étudions dans les circonstances ordinaires.

Mars. — Cette planète possède aussi une atmosphère, mais si mince qu'elle permet de voir les continents beaucoup mieux que sur Vénus (*fig.* 250 et 251). Près des pôles, on voit des taches blanches qui vont en croissant et en décroissant, suivant les saisons de Mars lui-même, ce qui prouve que ce sont des amas de neige ou de nuages. Dans la saison d'hiver de chaque hémisphère de la planète, ces taches prennent un grand développement; mais, en été, elles se réduisent à une calotte peu étendue environnée de taches brunes. Les taches plus éloignées des pôles nous offrent une double couleur, rouge et bleue, parsemée quelquefois de jaune ou plutôt de blanc. Les taches bleues, en présentant des teintes plus sombres, correspondent aux mers, le rouge aux continents, le jaune aux nuages : ce jaune n'étant que le résultat du contraste dû à la juxtaposition du blanc et des autres couleurs. Une partie du rouge est également due à des effets de contraste; mais cette couleur doit aussi tenir aux matériaux qui composent la surface de la planète. Dans ces vastes étendues, on voit quelquefois apparaître des taches blanches : ce sont sans doute des nuages. Quelquefois on aperçoit des tourbillons contournés en spirale : ce sont des bourrasques. La révolution est de $1^a 321^j,7$; la rotation a lieu en $24^h 37^m 23^s$. L'année étant plus longue que sur la Terre, l'axe plus incliné sur le plan de l'orbite (30°18′), l'excentricité étant plus considérable, les saisons doivent offrir des différences bien plus tranchées. La radiation solaire y est 0,43 de celle que nous éprouvons; la masse totale est 0,13 de celle de la Terre.

Petites planètes. — Nous savons encore bien peu de chose sur la constitution physique de ces astéroïdes. Leur volume est très-petit, et il n'y en a pas un seul qui soit aussi gros que la Lune. A en juger par l'éclat dont ils brillent, les plus considérables doivent avoir des dimensions qui permettent de les

comparer à un corps irrégulier offrant une surface comme celle de l'île de Sicile; mais les plus récemment découverts sont tellement petits qu'ils semblent servir de transition entre les planètes et les aérolithes. Leurs masses sont également très-faibles. Ils sont si nombreux (169), leurs orbites se croisent en tant de points qu'un choc ne serait pas impossible, comme l'a très-bien montré M. Littrow, de Vienne. Ce choc les briserait infailliblement et pourrait donner naissance à des aérolithes. Nous avons déjà dit que leurs masses réunies ne forment pas le tiers de la masse terrestre.

JUPITER. — C'est la plus grosse de toutes les planètes. Sa

Fig. 252.



masse est $\frac{1}{1047}$ de celle du Soleil, ou 301 fois celle de la Terre; elle est trois fois plus considérable que celle de toutes les autres planètes réunies; aussi est-il incontestable qu'elle a dû exercer une influence assez grande sur la formation des planètes plus voisines, en particulier sur celle des petites planètes. Jupiter est entouré d'un magnifique cortége de quatre satellites, dont le plus petit dépasse de beaucoup la Lune, et dont le plus gros présente des dimensions qui permettent de le comparer à la planète Mars. La *fig.* 252 représente leur grandeur relative.

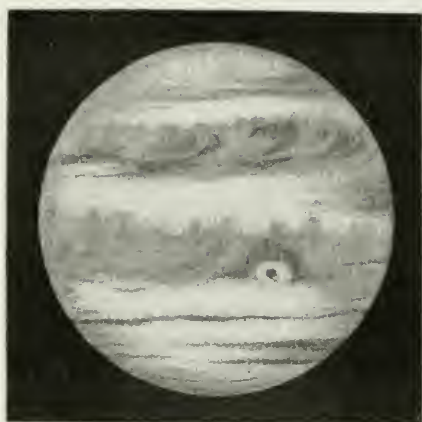
Le volume de Jupiter est 1233 fois plus considérable que celui de la Terre, mais sa densité est beaucoup plus faible: elle est égale à 1,36, et moindre que celle du Soleil et à peine plus grande que celle de l'eau. La gravité à sa surface est deux fois et demie plus considérable qu'à la surface de la

Terre; il doit en résulter une pression très-considérable, circonstance qui, jointe à la faible densité que nous venons de signaler, ne permet pas de croire que cette planète soit à l'état solide. Son aspect annonce d'ailleurs de très-grandes agitations, et les zones qu'on y observe sont loin d'offrir un système simple et stable. Nous avons déjà parlé de leurs variations dans le paragraphe précédent. La *fig.* 253 représente l'aspect qu'offrait Jupiter le 10 octobre 1856; on y voit une grande tache noire qui n'est pas l'ombre d'un satellite, et qui ne saurait être qu'une ouverture faite dans une couche de nuages, sans doute par un ouragan. La *fig.* 254 (6 décembre 1857) fait voir quelles modifications profondes ses zones peuvent éprouver dans un temps très-court. Ici la tache est l'ombre d'un satellite. L'axe de rotation étant très-peu incliné sur le plan de l'orbite, ces modifications ne sauraient être attribuées au Soleil, car les saisons doivent être peu variées. L'atmosphère très-dense doit être encore le siége de révolutions analogues à celles que la Terre a subies elle-même aux époques géologiques; nous avons déjà fait remarquer que sa composition est différente de celle de l'atmosphère terrestre. En 1872, Jupiter présenta, dans les régions équatoriales, une couleur rouge très-prononcée. Nous n'avons jamais rien observé de semblable, si ce n'est en 1861 où nous avons aperçu quelques traces de même couleur, mais beaucoup moins vives. L'absorption atmosphérique est si grande aux bords de la planète que les satellites paraissent comme des taches brillantes au moment où ils entrent sur son disque; à mesure qu'ils avancent, ils disparaissent progressivement, et ils finissent par produire l'effet de taches sombres, quoiqu'ils ne paraissent jamais complétement noirs.

L'année de Jupiter dure $11^{a}314^{j},834$; sa rotation dure $9^{h}55^{m}26^{s},5$. Cette rotation, si rapide dans un corps aussi

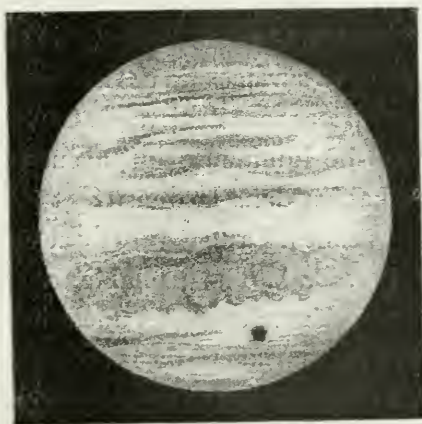
volumineux, développe une force centrifuge très-considé-

Fig. 253.



rable, d'où il résulte un aplatissement très-grand et très-facile à constater.

Fig. 254.



SATURNE. — Cette planète est la plus grande après Jupiter. Sa masse est $\frac{1}{3510}$ de celle du Soleil, 90 fois celle de la Terre. Son volume est proportionnellement très-grand, car sa den-

sité est seulement égale à 0,73, de sorte qu'on peut lui appliquer à plus forte raison ce que nous venons de dire de l'état nébuleux de Jupiter. On est confirmé dans cette opinion par les bandes nombreuses que présente sa surface, et par les zones d'absorption que présente son spectre, et qui sont encore plus fortes que celles de Jupiter. Ses pôles ont une couleur approchant du bleu, tandis que l'équateur est d'un blanc éclatant. Son diamètre moyen égale 8″,095.

Saturne possède le plus beau cortége qui existe dans notre système solaire : outre huit satellites, dont le plus gros est comparable à la planète Mars, il est entouré de ce merveilleux anneau qui subsiste là comme pour témoigner de l'origine de tout le système solaire, et pour confirmer l'exactitude des hypothèses que nous avons précédemment exposées. Cet anneau est très-mince, proportionnellement à sa largeur. Il se compose, en réalité, de trois anneaux distincts et séparés; le plus extérieur (*fig.* 255) est un peu sombre, le suivant est plus brillant, le troisième est tout à fait nébuleux et transparent. Les contours de l'ombre de la planète sur l'anneau nous prouvent que les surfaces de ces anneaux sont courbes, et que leurs génératrices sont des ovales. On y voit de grandes différences d'intensité lumineuse qui accusent des irrégularités très-remarquables dans la densité et dans la composition des différentes zones. La structure de cet anneau n'est pas facile à saisir. L'opinion la plus probable, c'est qu'il est composé de particules indépendantes les unes des autres, comme un nuage, ou comme un amas de poussière, car un corps solide ne résisterait pas aux tensions que doivent produire les attractions combinées des satellites et de la planète; on ne conçoit pas davantage qu'une masse liquide puisse, dans ces circonstances, conserver indéfiniment la forme annulaire. D'après M. Roche et M. Simon, la plus petite distance à la-

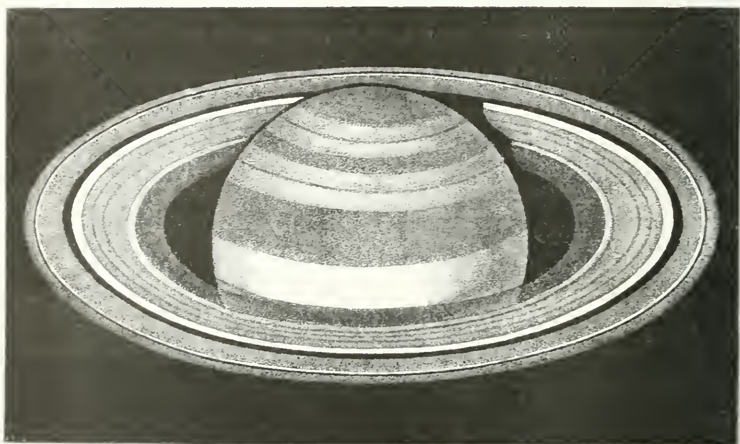
quelle un satellite peut subsister est égale à deux fois et demi le rayon de la planète; la distance qui sépare Saturne de son anneau est inférieure à cette limite. Il paraît donc probable que la nébuleuse secondaire qui a produit cette planète, se trouvant arrivée à un degré de condensation où la production des satellites proprement dits était devenue impossible, laissa échapper une multitude de corpuscules solides, une espèce de poussière qui prit la forme annulaire. Ces anneaux sont sillonnés de bandes assez nettes qui varient avec le temps ; c'est ce qui prouve que les différentes zones éprouvent des perturbations considérables et indépendantes les unes des autres. Leur diamètre extérieur égale 20″,03.

L'année de Saturne est de $29^a 166^j,97$ et, comme l'anneau est incliné sur notre écliptique de 28° 10′ 44″, la Terre se trouve tous les quinze ans dans son plan, au moment où il passe à ses nœuds qui sont situés à 66° 53′ et 346° 53′ de longitude. Alors l'anneau n'est visible que par sa tranche, et on l'aperçoit comme un mince filet très-délié dépassant la planète de part et d'autre. La figure, au contraire, le représente dans la position la plus favorable, la plus écartée de celle que nous venons de décrire.

L'équateur de la planète coïncide avec l'anneau, et il est incliné de 26° 48′ 40″ sur le plan de l'orbite. La chaleur du soleil y est seulement égale aux 0,011 de celle que nous recevons. Vu de la planète, l'anneau présente des phénomènes singuliers, et il produit des occultations diurnes du Soleil très-variables suivant les latitudes; mais, à part quelques zones peu étendues, il ne produit pas d'éclipse permanente. Il n'est peut-être pas complétement opaque; l'anneau intérieur est même tout à fait transparent, et l'on peut, sous ce rapport, le comparer aux queues des comètes. Les lignes noires qui séparent les trois anneaux sont absolument vides et consti-

tuent des séparations véritables, car, à l'époque où l'anneau tourne sa partie obscure vers la Terre, on aperçoit à chaque séparation la lumière réfléchie par la tranche des différents anneaux. Nous avons constaté qu'il est légèrement elliptique et excentrique, et qu'il fait sa révolution en $14^h 12^m$ environ; c'est le temps nécessaire, d'après la théorie, pour la révolution d'un satellite dont la distance à la planète serait égale

Fig. 255.



à la distance moyenne de l'anneau. Quant à la planète, sa révolution se fait en $10^h 20^m 17^s$.

Les satellites, au nombre de huit, sont tous extérieurs à l'anneau. Les plus rapprochés sont très-petits, les plus grands sont plus éloignés. Nous renverrons pour plus de détails à notre ouvrage intitulé : *Tableau physique du système solaire.*

Uranus. — Nous savons fort peu de chose sur cette planète. Comme toutes les planètes extérieures aux astéroïdes, elle a une densité très-faible (0,82), et son atmosphère jouit d'un pouvoir absorbant très-considérable. Nous avons étudié son spectre, et nous l'avons trouvé très-différent de celui

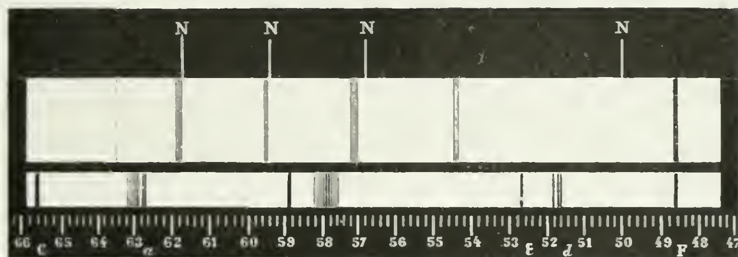
du Soleil et très-analogue à celui des comètes. La *fig.* 256 représente l'intensité de la lumière dans ses différentes parties. Le jaune et le rouge sont très-faibles. Dans le vert et dans le bleu il y a deux raies très-larges et très-noires qui n'existent pas dans le spectre solaire; aussi serait-on tenté de croire qu'elle est un peu lumineuse par elle-même. M. Hug-

Fig. 256.



gins a étudié ce spectre avec un instrument plus puissant que le nôtre, et il en a donné un dessin que nous reproduisons dans la *fig.* 257. Le jaune y est assez développé; on y voit une raie assez forte, les autres ne se retrouvent point dans le spectre de notre atmosphère. Une de ses bandes semble

Fig. 257.



cependant coïncider avec la raie F de l'hydrogène, et les autres ne sont pas très-éloignées des raies de l'azote. M. Vogel y a trouvé huit raies obscures; celle du vert bleu coïncide avec Hβ de l'hydrogène. On voit combien ces recherches présentent d'intérêt, mais le dernier mot n'a pas été dit sur ce spectre curieux.

La masse d'Uranus est seulement égale à 22 fois celle de la Terre. Cette planète possède quatre satellites dont l'existence est bien constatée; le plan de leur orbite est très-incliné sur

celui de la planète. Nous ignorons la durée de sa rotation, et nous ne connaissons pas davantage la direction de son axe. Sa révolution est de $84^a\,5^j,83$.

NEPTUNE. — Cette planète est célèbre parce que sa découverte a été un véritable triomphe pour le principe de la gravitation. Son diamètre est six fois plus grand que celui de la Terre. Sa densité est 0,91, c'est-à-dire très-faible, et son volume est 105 fois celui de la Terre, plus considérable que celui d'Uranus. Sa couleur verte, analogue à celle de l'eau de mer, montre que son atmosphère exerce une forte absorption sur les rayons solaires ; ce fait est confirmé par les observations faites au spectroscope. La première et la plus faible des raies de ce spectre se trouve entre le vert et le jaune, presque à la même distance de D que la raie B ; elle est large, mais mal définie. Dans le vert, il y a une autre raie assez nette, mais mal terminée sur ses bords. Il y en a une troisième dans le bleu. On voit scintiller plusieurs lignes brillantes dans le vert. On trouve que les bandes sombres coïncident avec les bandes des étoiles du quatrième type. Il serait intéressant de soumettre ce spectre à un nouvel examen en employant des instruments plus puissants ; on pourrait ainsi fixer avec plus d'exactitude la position de ces bandes et voir si elles ont quelque relation soit avec la lumière de la couronne solaire, soit avec celle de l'aurore boréale, soit avec le spectre du carbone. Le vif éclat dont brille cette planète, malgré l'énorme distance du Soleil, pourrait même faire croire qu'elle est un peu lumineuse. Nous n'avons jamais vu son contour bien nettement terminé, ce qui s'accorderait parfaitement avec l'hypothèse d'un état nébuleux [1] Sa masse est $\frac{1}{15000}$

---

[1] On a contesté cette assertion ; nous l'avons cependant vérifiée dans certaines nuits où les satellites de Jupiter étaient très-nets.

de celle du Soleil, 17 fois celle de la Terre. Elle possède un satellite qui fait sa révolution en $5^j,877$, et dont le mouvement est direct. Nous ne connaissons pas la durée de sa rotation; sa révolution s'exécute en $164^a 225^j,7$

Tels sont les principaux corps célestes qui font partie du système solaire; ce sont les seuls que nous connaissons, mais nous ne saurions affirmer qu'il n'en existe pas d'autres. On a soupçonné l'existence d'une planète dont l'orbite serait intérieure à celle de Mercure; car, à plusieurs reprises, on a vu passer sur le Soleil des points noirs animés d'un mouvement assez rapide. M. Le Verrier, qui s'était déjà trouvé conduit par la théorie de Mercure à supposer l'existence d'une ou de plusieurs planètes intramercurielles, a récemment discuté toutes ces observations ([1]) Il a montré que six de ces passages supposés (parmi lesquels celui qui a été vu par M. Lescarbault en 1859) pourraient être attribués à une planète faisant sa révolution en trente-trois jours, et qui passerait par ses nœuds en mars et octobre. On l'a appelée *Vulcain;* peut-être n'est-elle pas unique. On a fait beaucoup de recherches pour la voir pendant l'éclipse de 1869, mais on n'est arrivé à aucun résultat. S'il y a quelque autre planète au delà de Neptune, son existence pourra nous être révélée par les perturbations qu'elle doit exercer; on pourra bien la découvrir par une observation attentive des petites étoiles, mais cette découverte demandera beaucoup de temps, car, son mouvement devant être très-lent, on la confondra pendant longtemps avec les étoiles fixes, comme il est arrivé pour Neptune, qu'on trouve enregistré dans le *British Association Catalogue* comme une étoile.

([1]) Voir *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences,* septembre et octobre 1876.

Satellites. — Parmi ces corps de troisième ordre de notre système, nous ne connaissons bien que celui qui accompagne la Terre, c'est-à-dire la Lune. Notre satellite possède une masse considérable et il est situé à une distance relativement grande de la Terre : ces deux circonstances offrent une difficulté sérieuse lorsqu'on veut rattacher la formation de la Lune à la théorie nébulaire. D'après M. Roche, elle aurait été formée dans l'intérieur de l'atmosphère terrestre, à une époque où celle-ci avait une étendue supérieure à 60 rayons terrestres ; plus tard, cette atmosphère, en se contractant progressivement, a dû abandonner la Lune, lui laissant comme marque de son origine deux caractères importants : 1° elle a la forme d'un sphéroïde dont le plus grand axe est dirigé vers la Terre ; 2° la durée de sa rotation et celle de sa révolution sont exactement égales, d'où il résulte qu'elle tourne toujours la même face vers la Terre.

Les accidents de sa surface sont bien connus, et nous ne nous arrêterons pas à en faire la description (1). La forme des cratères qui sont répandus sur sa surface prouve d'une manière évidente que jadis l'action expansive des masses incandescentes qu'elle contenait dans son sein y a produit de graves convulsions. Nous ignorons si cette activité dure encore, car il n'y a pas de preuve certaine de changement dans la forme de ses cratères, ni aucun autre signe d'explosion ou d'éruption. Actuellement, notre satellite est privé de toute atmosphère sensible, et il n'y a point d'eau à l'état liquide sur sa surface ; mais on ne peut pas assurer qu'il en ait toujours été ainsi. On voit des corrosions manifestes dans certains cratères voisins des plaines qu'on désigne sous le nom de *mers*. Ces mers ne

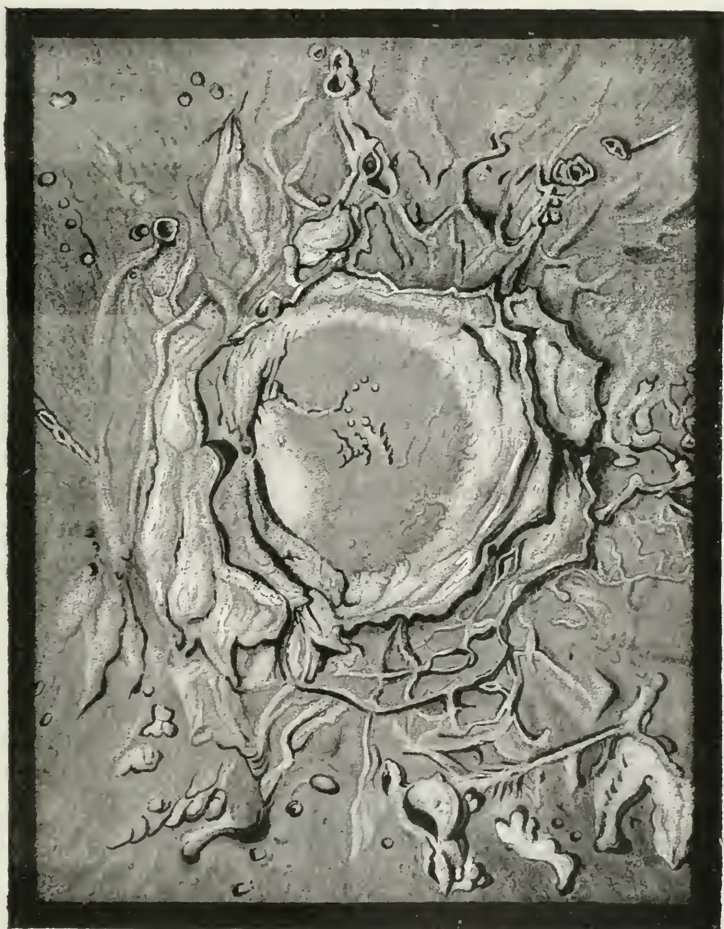
(1) Voici deux dessins qui donnent une idée du cratère connu sous le nom de

sont pas remplies d'eau liquide ; mais, comme elles sont assez sombres et qu'elles polarisent fortement la lumière, il pourrait se faire qu'elles fussent remplies par des glaciers.

Il est donc évident que la Lune a passé jadis par les pé-

Copernic. La *fig.* 258 le représente tel qu'on le voit le dixième jour de l'âge de la

Fig. 258.



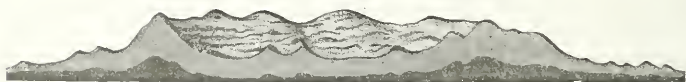
riodes géologiques que la Terre traverse aujourd'hui ; mais, comme sa masse est très-petite, elle s'est refroidie plus rapidement. A en juger par les apparences cratériformes qu'elle présente sur toute sa surface, à l'époque de ses dernières révolutions, elle devait être recouverte d'une croûte solide d'une faible épaisseur, cédant facilement à toutes les expansions locales qui provenaient de l'intérieur, sans éprouver de vastes déformations comme celles qui, à la surface de la Terre, ont fait surgir de si longues chaînes de montagnes. De plus, les montagnes terrestres, produites d'abord par des soulèvements, ont subi ensuite des modifications considérables causées par des érosions dues aux agents atmosphériques ; dans la Lune, cette cause fait défaut ou son action est très-faible, et par conséquent l'aspect doit être très-différent. La faible résistance de la croûte lunaire est due en partie à ce que la pesanteur est peu considérable (0,16 seulement de la pesanteur à la surface de la Terre), et en partie à la faible densité des matériaux qui la composent : cette densité est 3,40.

La Lune tourne toujours le même hémisphère vers la Terre, de sorte que sa révolution et son mouvement de rotation s'exécutent dans le même temps. Cette particularité montre que le centre de gravité de notre satellite est placé en dehors du centre de figure, ou bien que sa figure est un ellipsoïde à trois axes inégaux. Les observations ont confirmé cette con-

---

Lune. La *fig.* 259 est une coupe verticale faite à travers ce même cratère ; afin de

Fig. 259.



mieux indiquer le relief, on a exagéré la hauteur, mais elle est exactement indiquée par la ligne plus noire de la base.

clusion, et elles ont montré que le plus grand des trois axes est celui qui est dirigé vers la Terre.

Le diamètre de la Lune est relativement très-considérable, car il égale les 0,27 de celui de la Terre; sa masse est égale à $\frac{1}{77}$: pour tous les autres satellites, ces proportions sont beaucoup plus petites. En revanche sa distance à la Terre est assez grande, presque 60 rayons terrestres, et, à l'exception du dernier satellite de Saturne, il n'y a pas d'exemple d'une distance relative aussi grande entre une planète et son satellite.

On a cru que tous les satellites, à l'exemple de la Lune, tournent toujours la même face à leur planète; mais jusqu'à présent rien n'autorise à regarder cette loi comme générale. Nous avons pu constater la rotation des satellites de Jupiter, grâce aux taches qui se trouvent à leur surface, et M. Dawes a confirmé les résultats de nos observations. Quoique nous ne puissions pas fixer exactement la durée de leur rotation, nous pouvons cependant affirmer qu'elle n'est pas égale à la durée de leur révolution. La loi ne s'applique donc certainement pas à Jupiter: elle se vérifie probablement pour quelques-uns des satellites de Saturne ; mais il est difficile de rien dire sur la constitution physique de ces astres de troisième ordre autres que la Lune. On a cependant observé une particularité très-remarquable, c'est que les durées de leurs mouvements sont commensurables, surtout pour le système de Jupiter, et qu'il y aurait un rapport assez simple entre le nombre qui mesure leur révolution et celui qui mesure leur rotation supposée : rapport qui, pour la Lune, est aussi simple que possible, puisqu'il est égal à l'unité. Quelques satellites ont des vitesses énormes. Le premier satellite de Saturne, par exemple, parcourt en vingt-deux heures une orbite presque égale à celle que la Lune parcourt dans un mois.

CHAPITRE IV.

LES COMÈTES ET LES ÉTOILES FILANTES.

§ I. — *Les comètes.*

Les comètes forment une partie importante du cortége solaire ; mais proviennent-elles de la même nébuleuse, ou bien dérivent-elles d'une source étrangère ? Cette question, posée depuis longtemps, semble maintenant assez près d'être résolue. Leurs formes étranges, leur marche qui a lieu dans toutes les directions, et souvent en sens contraire de celle des planètes, leurs orbites très-inclinées sur l'écliptique et souvent perpendiculaires à ce plan fondamental sont autant de preuves qui tendent à leur assigner une origine étrangère. Si donc nous les étudions, c'est qu'elles nous présentent des particularités instructives, et qu'elles peuvent nous donner l'explication de phénomènes importants et nous permettre même de résoudre des problèmes relatifs à la nature du Soleil.

On divise communément les comètes en deux catégories, relativement à l'étendue de leurs orbites. Les comètes périodiques sont celles dont la révolution s'accomplit dans les limites du système solaire ; elles ont toutes des orbites elliptiques très-allongées. On en connaît six ou sept. La plus célèbre est celle de Halley, qui accomplit sa révolution en 75 ans ; les autres ont des périodes de 5 à 6 ans seulement ; celle de Encke, dont la période est la plus courte, accomplit sa révolution en $3^a,30$ environ.

La seconde catégorie, la plus nombreuse de beaucoup, contient les comètes dont les orbites sont paraboliques. A dire vrai, il n'est pas probable que ces astres décrivent rigoureusement des paraboles; ils tracent sans doute des ellipses si allongées ou des hyperboles tellement déterminées, que nous les confondons avec des paraboles dans la partie très-

Fig. 260.



Grande comète de 1858 dessinée par Bond.

restreinte de leur course où nous pouvons les voir. Si, en entrant dans la sphère d'attraction du Soleil, elles possèdent des vitesses très-grandes, elles doivent décrire des hyperboles; si, au contraire, leur vitesse est assez faible à ce moment, elles doivent parcourir des paraboles ou des ellipses très-allongées. Il faut observer que, si l'orbite d'une comète s'étendait jusqu'à ces régions de l'espace où l'attraction du Soleil est égalée par celle de quelque autre étoile, aussi rapprochée qu'on puisse la supposer, sa révolution aurait une durée d'au moins un million d'années! Il serait donc impossible de dis-

tinguer si son orbite est parabolique ou elliptique. Cependant, une fois entrée dans le domaine du Soleil, elle pourrait y être retenue par l'action perturbatrice des grandes planètes; leur attraction pourrait modifier complétement la forme et même la nature de son orbite, et abréger la durée de sa révolution en lui faisant décrire une ellipse à courte période. C'est ce que M. Le Verrier a démontré pour la comète dite de Lexell, pour celle de De Vico et pour plusieurs autres.

La forme des comètes excite surtout l'étonnement du peuple et attire l'attention des savants. Leur apparition souvent soudaine n'est qu'un effet de la position de leur orbite par rapport à l'horizon; elles peuvent, à cause de la rapidité de leur mouvement, passer en très-peu de temps d'un hémisphère dans l'autre. Ainsi la comète du mois de juin 1861 apparut en Europe d'une manière soudaine; mais elle était visible depuis quelques semaines dans l'autre hémisphère. Celle de 1843 sortit à l'improviste des rayons solaires; mais, peu de jours auparavant, on l'avait vue très-près de cet astre comme une flamme éclatante.

En général, lorsqu'une comète apparaît d'abord au fond de l'espace, se dirigeant vers le Soleil, elle ressemble à une faible nébuleuse ronde ou ovale. En approchant du Soleil, elle paraît grossir, et développe une partie intérieure plus brillante, qu'on appelle le *noyau*. Ce noyau est entouré d'une atmosphère vaporeuse, ordinairement allongée et dissymétrique, dont le côté le plus étroit est tourné vers le Soleil. Telle est la forme définitive des petites comètes; mais, en s'approchant du périhélie, les plus grandes donnent naissance à des jets lumineux qui semblent s'élancer du noyau vers le Soleil, se recourbent ensuite pour former en arrière, à peu près à l'opposé du Soleil, une traînée lumineuse qu'on appelle la *queue* de la comète Le maximum d'éclat se présente quel-

ques jours après le périhélie; à partir de ce moment, l'astre devient moins lumineux, les jets disparaissent, la queue se dissipe, et la comète reprend de nouveau l'aspect d'une simple nébulosité qu'elle présentait au commencement de son apparition. Telle est l'histoire de toutes les grandes comètes, celle de 1858 (*fig.* 260 et 262), celle de 1861 (*fig.* 261, 263, 264) et celle de 1862 (*fig.* 265). Nous donnons deux figures de cette dernière comme elle se présentait le 22 et le 23 août, en renvoyant pour les autres aux *Mémoires de l'Observatoire du Collége Romain*, 1863.

Arrivons maintenant à des particularités de la dernière importance. D'abord la densité des comètes est très-faible; même à travers les parties les plus brillantes, on peut facilement apercevoir des étoiles de 9e et de 10e grandeur. Le noyau lui-même n'est pas solide; il est, en général, composé d'une masse vaporeuse. En 1856, nous avons vu une étoile de 8e grandeur à travers le noyau de la comète de Biéla. En 1861, nous avons vu le noyau augmenter et diminuer avec une si prodigieuse rapidité qu'on ne pouvait nullement expliquer ces modifications par la variation de la distance. Sa figure constamment ronde (voir *fig.* 263, 264) prouvait bien qu'il était translucide, car, dans les positions qu'il occupait, il aurait dû présenter des phases; or on n'a jamais observé sûrement rien de semblable; les phases dont parlent quelques observateurs anciens ne sont que les jets lumineux dont nous avons parlé plus haut, qui constituent comme un éventail ressemblant à un croissant.

Les jets lumineux sont plus ou moins irréguliers; quelquefois même ils reparaissent périodiquement, comme on l'a remarqué en 1862 (voir *fig.* 265); dans cette comète, un jet lumineux se formait au moment où le premier venait de disparaître, et, lorsque le second semblait épuisé, le premier

reparaissait à son tour. Ces jets, arrivés à une certaine élévation, se repliaient en arrière et allaient former la queue (¹). L'alternative de ces jets nous embarrassa dans les premiers jours, jusqu'à ce que leur jeu fût enfin compris. En 1858 et en 1861, il y avait un grand nombre de ces jets qui, arrivés à une certaine hauteur, formaient un halo ou un arc brillant se prolongeant en arrière jusque dans la queue (*fig.* 262-264). La lumière de ces astres, toujours pâle et blafarde, prouve qu'ils ne sont pas assez denses pour réfléchir la lumière comme les planètes.

Fig. 261.



Grande comète de 1861

Les dernières comètes ont été examinées au spectroscope, et elles ont donné un spectre discontinu : leur lumière se réduit en général à trois bandes bleue, verte et jaune-rouge, séparées par des lacunes ou projetées sur un faible spectre continu. Dans celle de Winnecke, juin 1868, le maximum d'éclat se trouvait dans trois régions qui, d'après nos observations et celles de M. Huggins, faites au même moment que les nôtres, coïncidaient avec les raies du carbone. Notre affirmation reposait sur de simples mesures micrométriques ; M. Huggins est arrivé au même résultat par la superposition des spectres représentée dans la *fig.* 266 : toutes les comètes qui sont venues après ont donné

(¹) Voir les *Mémoires de l'Observatoire du Collège Romain*, 1863.

un spectre pareil. La seule différence a été que, parfois, la bande la plus brillante était la verte, et d'autres fois la bleue, ce qui tenait à la nature du gaz, qui était du carbone combiné soit avec l'oxygène, soit avec l'hydrogène.

La comète de Coggia, en 1874, avait un spectre à bandes

Fig. 262.



Tête de la comète de 1858 observée par Bond.

dans la nébulosité, pendant que dans le noyau, plus dense et réfléchissant la lumière solaire, le spectre était sensiblement continu. Comment ces combinaisons de carbone pourraient-elles se trouver à l'état de vapeur dans les comètes? Nous l'ignorons complètement, mais ce n'est pas une raison suffisante pour le nier, et ce qui est encore plus frappant, c'est que le spectre des comètes est parfaitement égal au spectre

des gaz qui sont développés par la chaleur dans les aérolithes ([1]). Nous reviendrons sur ce point important. On a pensé que la discontinuité du spectre des comètes était un simple phénomène d'absorption, mais nous ne saurions l'admettre sans preuves directes, qui font encore défaut.

Les comètes, outre une lumière propre, émettent encore une lumière polarisée, surtout dans la chevelure, et le plan de polarisation passe par le Soleil. On peut comparer cette polarisation au phénomène qui a lieu lorsqu'un faisceau de rayons solaires pénètre dans une chambre obscure : les rayons se polarisent alors en se réfléchissant sur les nombreuses facettes des grains de poussière qui voltigent dans l'air ; aussi a-t-on comparé les comètes à des amas de matière pondérable très-divisée. M. Tyndall a trouvé des gaz qui, étant amenés à un état d'extrême raréfaction, réfléchissent la lumière par une espèce de phosphorescence spéciale qui les rend lumineux et leur fait émettre de la lumière polarisée; mais il n'y a pas là une simple réflexion; y aurait-il un phénomène de fluorescence?

L'opinion la plus probable est que les comètes sont composées d'une multitude de particules solides flottant dans une atmosphère gazeuse ; il résulterait de là deux spectres : l'un, composé de bandes, serait dû aux gaz qui, développés par la chaleur solaire, deviennent lumineux et donnent la lumière propre à leur nature; l'autre, continu, serait produit par la réflexion des particules solides. Cette hypothèse sera confirmée bientôt, quand nous aurons exposé les découvertes importantes faites sur les étoiles filantes.

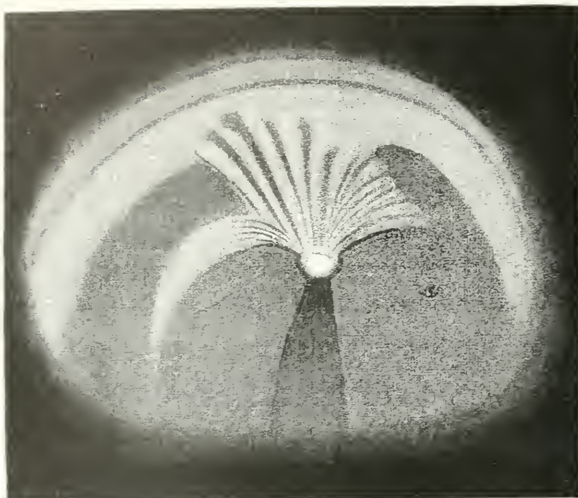
Les comètes étant composées d'une matière très-raréfiée, gaz

([1]) WRIGHT, *American Journal of Science*, septembre 1876.

ou poussière cosmique, il n'est pas étonnant qu'en s'approchant du Soleil, en subissant l'action directe de ses rayons qui les pénètrent et les échauffent, elles se dilatent d'autant plus facilement que cette diffusion n'éprouve qu'une résistance très-faible de la part de la gravité. En effet, on a calculé que, à une très-petite distance de la surface cométaire, le noyau exerce sur les molécules de son atmosphère une attraction plus faible que celle du Soleil, de sorte que, dans l'intérieur même de la chevelure, la première de ces deux forces est négligeable par rapport à la seconde. Cette expansion une fois produite par la chaleur, la masse doit donc se disperser dans l'espace, sans que l'attraction du noyau soit capable de la ramener. C'est ce qu'on voyait dans la comète de 1858, dont la queue laissait échapper des bandes lumineuses (*fig.* 260) qui s'ajoutaient à la queue parallèlement l'une après l'autre. Les particules ainsi séparées continuent leur marche comme des corps indépendants, et leur assemblage présente les formes que revêtent les queues et les aigrettes.

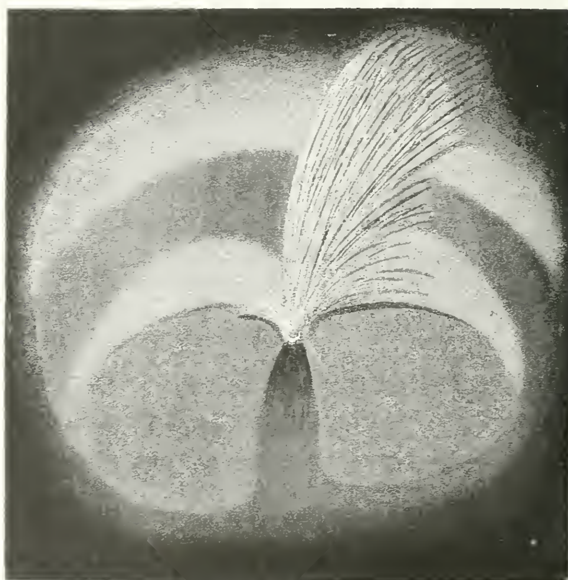
En effet, non-seulement la théorie prouve que cela doit arriver, mais l'observation le confirme, car on a vu des comètes se diviser en deux et chaque portion suivre sa route indépendamment de l'autre. Telle fut celle de Biéla, qui, en 1846, nous présenta ce phénomène, qu'on avait déjà vu du temps de Kepler. On crut à quelque illusion pour les observations anciennes; mais, pour celle de 1846, le doute était impossible, car les astronomes purent en suivre les phases. Elle parut d'abord avec deux noyaux; puis on vit les deux parties réunies par un filet faiblement lumineux, enfin elles se montrèrent complétement indépendantes. A l'apparition suivante, en 1852, les deux corps étaient séparés et très-éloignés l'un de l'autre. En 1872, la comète n'a point reparu; mais la Terre, en traversant son orbite le 27 novembre, a été

Fig. 263.



Tête de la comète de 1861 observée par l'Auteur le 30 juin.

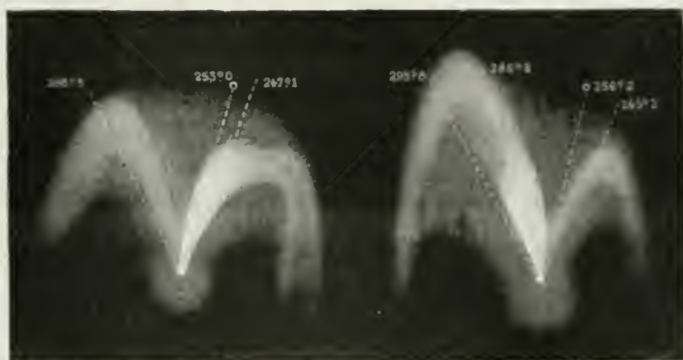
Fig. 264.



Tête de la comete de 1861, observée par l'Auteur le 1er juillet.

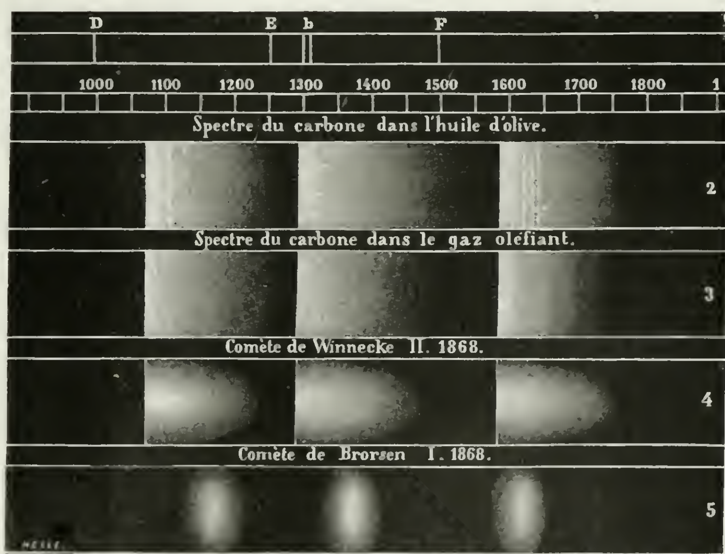
atteinte par la splendide pluie d'étoiles filantes dont nous parlerons plus loin.

Fig. 265.



Comète II de 1862, observée le 22 et le 23 août

Fig. 266.



Ces astres errants ne présentent donc aucune fixité dans

leur forme. Quant à leur masse, il ne faudrait pas la croire complétement nulle. La comète de 1861 avait une masse au moins égale à celle de 58 mètres cubes d'eau, et tout au plus équivalente à celle de l'atmosphère terrestre. Si une masse semblable venait à tomber tout entière sur une planète, elle ne laisserait pas que d'avoir quelque mauvaise influence ; mais, vu le volume considérable de la comète, la planète la traverserait facilement, et son influence ne pourrait jamais être très-grande ; tout au plus verrait-on dans l'atmosphère une pluie de poussière ou d'étoiles filantes ([1]).

Les astronomes se sont donné bien du mal pour tâcher d'expliquer la forme des comètes. Il est certain que ces formes bizarres sont en partie l'effet de l'attraction combinée avec l'action de la chaleur solaire. Les figures qu'a présentées la comète II de 1862 font voir cela d'une manière frappante. Les jets se succédaient tantôt sur un point, tantôt sur un autre, comme dans un corps en explosion sous l'action de la chaleur. La masse de la comète étant très-petite, il s'ensuit qu'à une très-faible distance du noyau la force dominante est l'attraction du Soleil et non celle de la comète elle-même. La radiation solaire échauffe la masse, la dilate et emporte les molécules en dehors de la sphère attractive du noyau, et alors elles deviennent libres et sont comme des masses distinctes et sans liaison entre elles, devant suivre leur route indépendamment de l'astre dont elles faisaient naguère partie. Or le calcul nous apprend que les particules qui sont poussées par la dilatation vers la partie extérieure transforment dans ce cas leur orbite parabolique en une orbite hyperbolique peu différente de la précédente ; celles qui

---

([1]) Nous écrivions ces paroles en 1861, et nous étions loin de supposer qu'elles dussent être sitôt justifiées, comme elles l'ont été en 1872.

sont poussées vers le Soleil la transformeront en une ellipse; la masse se trouvera ainsi dispersée à l'intérieur beaucoup plus qu'à l'extérieur, et par suite l'une des deux branches pourra rester visible pendant que l'autre pourra disparaître en raison même de son épanouissement. Cette dispersion est une conséquence de la belle théorie de M. Schiaparelli sur les étoiles filantes; nous l'avons proposée dès 1867 [1] et nous la regardons comme la plus simple et la plus naturelle de toutes les explications qui ont été proposées. Pour comprendre comment se forment les queues multiples, il suffirait de calculer les différentes vitesses que la chaleur solaire peut imprimer à des substances de nature différente. La comète II de 1862, qui était fournie de plusieurs jets indépendants, avait aussi deux queues qui étaient produites par ces mêmes jets. Cette théorie peut également rendre compte des rebroussements qu'éprouvent les jets lumineux : il suffit pour cela d'admettre que ces lignes recourbées ne sont pas de véritables jets renversés, mais qu'elles résultent de l'assemblage des filets brillants de molécules abandonnées et lancées hors de la sphère du noyau.

Nous ne prétendons pas cependant expliquer ainsi tous les accidents des formes cométaires : si ce principe est vrai, il n'est peut-être pas suffisant. Il est bien possible, je dirai même très-probable, que le Soleil agisse dans cette circonstance d'une manière inconnue; il semble réellement exercer une action répulsive dont il est bien difficile de rendre compte, mais qui n'est pas sans exemple dans la nature. Si le Soleil agit à la manière des aimants, il peut, par une action diamagnétique, repousser plusieurs substances : c'est ainsi

---

(1) Voir *Bullettino meteor. del Osserv. del Collegio Romano*, p. 10.

que la flamme d'une bougie et l'hydrogène pur sont repoussés dans le champ magnétique d'un fort aimant, et nous savons que les comètes contiennent des composés carburés et hydrogénés analogues à ceux de la flamme; ils peuvent donc être vaporisés par le Soleil et repoussés. On a aussi invoqué la présence de l'éther, qui pourrait, en effet, agir d'une manière à nous inconnue sur cette masse échauffée et réduite à un état de division extrême, et nous sommes bien loin de connaître l'influence de ce milieu dans l'univers.

La conclusion générale de tous ces faits et phénomènes est que les comètes sont très-probablement de simples amas d'une matière nébuleuse étrangère à celle qui a constitué notre système, et qui, entrés une fois dans les limites de l'attraction solaire, y sont retenus par l'action perturbatrice des planètes, jusqu'à ce que l'action diffusive de la chaleur solaire les ait peu à peu dispersés dans l'espace. Cette théorie recevra une confirmation frappante de ce que nous allons dire du phénomène des étoiles filantes, d'après les découvertes récentes.

§ II. — *Les étoiles filantes.*

Il n'y a pas un seul de nos lecteurs qui n'ait aperçu, par une belle soirée d'été, quelqu'un de ces brillants météores, qui s'allument instantanément dans le ciel, et semblent se détacher de la voûte du firmament pour se précipiter vers la Terre, en laissant une traînée lumineuse qui s'évanouit bientôt. Ce phénomène, bien qu'il se présente à peu près toutes les nuits, prend cependant des proportions plus considérables à certains jours, dont le retour périodique a fortement attiré l'attention des savants, qui ont constaté les lois suivantes :

1° Les époques les plus remarquables sont la nuit du 10 août

et le matin du 14 novembre. Ces dates fixes nous interdisent toute théorie qui chercherait à attribuer ce phénomène à une cause météorologique. L'apparition du mois d'août dure plusieurs jours, et elle a son maximum le 10 : celle de novembre n'a lieu que dans la matinée du 14. Dans cette dernière, les météores ont été quelquefois si nombreux, qu'on les a comparés à des pluies de feu. Depuis 1833, on a étudié les récits des anciens chroniqueurs, et l'Américain M. Newton a reconnu que les pluies de feu qui ont, à certaines époques, jeté l'épouvante parmi les populations, n'étaient autre chose que l'apparition des étoiles filantes de novembre. Cette apparition n'est pas également remarquable chaque année, mais son éclat varie périodiquement ; le maximum revient à peu près tous les trente-trois ans ; elle se renouvelle ensuite pendant plusieurs années, puis elle diminue graduellement, et enfin elle cesse de se faire remarquer pendant une longue période, pour se reproduire plus tard et repasser de nouveau par le maximum au bout de trente-trois ans. De plus, l'essaim d'astéroïdes du mois de novembre ayant une faible épaisseur, la Terre ne met que quelques heures à le traverser ; aussi le maximum n'est-il visible que dans quelques régions circonscrites qui varient chaque année. L'apparition du mois d'août est plus constante, mais elle n'est jamais aussi brillante : elle est aussi sujette à des fluctuations sensibles d'intensité.

2° On a constaté que les trajectoires des différents météores divergent d'un même point du ciel qu'on appelle le *point radiant*. Ce point se trouve entre les constellations de Persée et de Cassiopée pour les météores du mois d'août, et pour ceux de novembre il se trouve dans celle du Lion, tout près de l'étoile ζ. MM. Greg, Al. Herschel, Schiaparelli, Denza, ont déterminé un grand nombre d'autres points ra-

diants pour les différentes époques de l'année. Il ne faut pas croire que toutes les étoiles filantes partent, en réalité, du radiant, seulement leurs trajectoires prolongées se rencontrent toutes en ce même point ou cette région assez étroite, sauf un petit nombre qu'on désigne sous le nom d'étoiles *sporadiques*. Cette convergence est un effet de perspective : les trajectoires véritables sont sensiblement parallèles, mais elles paraissent diverger d'après la même loi qui nous montre comme divergents les rayons du Soleil couchant qui passent entre les nuages.

3° Ces phénomènes sont certainement dus à l'inflammation de quelque matière combustible dans les régions supérieures de notre atmosphère. Dans l'apparition de novembre, on a souvent constaté que, là où les météores paraissent, il se forme de petits nuages qui persistent quelque temps après la disparition des météores et qui sont entraînés par les courants atmosphériques. Nous avons vu plus d'une fois ces nuages se dilater et prendre une forme contournée sous l'action des vents supérieurs. En réfléchissant sur le volume et sur la densité de ces nuages, nous pensons que leur masse ne peut pas être très-petite et que la matière qui les a produits en brûlant ne saurait être gazeuse ; si ces météores étaient gazeux et très-légers, ils n'auraient pas la force de pénétrer si profondément dans notre atmosphère ; ils se disperseraient dans l'air avant de s'enflammer. On voit souvent une masse se diviser en deux ou trois parties, quelquefois davantage, chacune d'elles conservant une forme nettement définie : elles sont donc composées de substances compactes capables de voler en éclats pendant leur combustion.

On a fait en Allemagne et en Angleterre de nombreuses observations, afin de déterminer la hauteur à laquelle se produisent ces météores. Nous avons nous-même fait des ob-

servations semblables entre Rome et Civita-Vecchia, stations distantes de 60 kilomètres et reliées par un fil télégraphique. La plus grande hauteur observée est de 200 kilomètres, la plus petite est de 50. Les plus beaux météores apparaissent à une hauteur comprise entre 90 et 100 kilomètres; ils s'éteignent à une hauteur comprise entre 30 et 50 kilomètres. Dans ce trajet, leur vitesse, qui était au moins de 17 et quelquefois de 70 kilomètres par seconde, se trouve réduite à 1200 ou 1500 mètres. Il y a donc eu une grande quantité de force vive perdue en apparence : une partie de cette force vive a été employée à mettre l'air en mouvement, l'autre a été transformée en chaleur. Cette chaleur peut être très-considérable et capable de volatiliser le corps, surtout s'il est facilement combustible. Les météores de novembre ont une plus grande vitesse, et ils sont plus rouges. Le spectroscope nous y a montré les raies du sodium, du magnésium, du fer, ou du moins des raies très-voisines de celles de ces métaux, qui sont tous très-combustibles. Les météores du mois d'août sont moins rapides; leur couleur n'est pas la même et semble indiquer une composition chimique différente.

4° Dans toutes les apparitions, on trouve une période diurne et une période annuelle. Dans la période diurne, le maximum a lieu de 3 heures à 6 heures du matin. La période annuelle consiste en ce que les météores sont plus nombreux dans la seconde partie de l'année que dans la première. D'après une théorie établie par M. Schiaparelli, ces deux circonstances remarquables dérivent de ce que la Terre rencontre les essaims de matière météorique plus directement le matin que le soir, et pendant le second semestre que pendant le premier. Nous pouvons, en effet, comparer la Terre passant à travers un essaim de ces corpuscules à un boulet de canon qui traverserait un essaim de moucherons; il en rencontrera

un bien plus grand nombre dans sa partie antérieure, et laissera un véritable vide derrière lui. Et si le boulet tourne sur lui-même, comme la normale à la surface qui est dirigée dans le sens du mouvement varie d'une manière continuelle, les points situés en avant, et qui par là se trouvent plus exposés aux chocs, varieront de la même manière. Le nombre horaire des étoiles filantes dépendra donc du point vers lequel la Terre se dirige à chaque instant, par rapport à la verticale de l'observateur : il sera maximum lorsque ce point sera aussi voisin que possible du zénith. Tout ce que nous venons de dire suppose une distribution uniforme des corpuscules météoriques ; pour les étoiles systématiques, il y aurait lieu d'introduire d'autres considérations. Les observations et le calcul confirment cette théorie ; mais, comme le maximum a lieu à 6 heures, c'est-à-dire après le lever du Soleil en été, on ne peut pas l'observer exactement.

Si l'on voit des étoiles dans la partie de la Terre qui est opposée à celle où a lieu le maximum, c'est que leur vitesse est plus grande que celle du globe terrestre. Ainsi, dans la nuit du 10 août, nous avons vu des bolides marcher très-lentement : ils provenaient d'une région du ciel opposée à la constellation de Cassiopée, où se trouve le point radiant. On avait déjà signalé ce mouvement rapide des météores, et, en partant des faits observés, M. Schiaparelli a prouvé que leur vitesse est environ une fois et demie (1,414) celle de la Terre. Cette vitesse suppose une orbite parabolique. Il en résulte un frottement et une condensation considérables lorsque ces corps pénètrent dans l'atmosphère : de là élévation de température, incandescence, volatilisation et combustion. Analysée au spectroscope, leur lumière accuse ordinairement la présence du magnésium, du sodium et du fer. Le calcul leur donne pour vitesse maximum $71^{km},5$, et pour minimum $16^{km},5$ par se-

conde. La moyenne de ces deux nombres diffère peu des vitesses qu'on a observées.

Les étoiles filantes sont donc de la même nature que les aérolithes; ceux-ci, étant composés d'une masse plus grande et plus compacte, ne brûlent pas complétement dans l'air; ils se fondent seulement et se vitrifient à la surface, tandis que les masses moins considérables des étoiles filantes sont complétement volatilisées. D'ailleurs, il paraît constaté que la vitesse des étoiles filantes est plus grande que celle des aérolithes, ce qui détermine un échauffement plus considérable. En effet, d'après M. Schiaparelli, la vitesse relative des aérolithes est égale à la différence entre leur vitesse absolue et celle de la Terre, tandis que, pour les étoiles filantes, ce serait la somme des deux vitesses.

5° On a reconnu les mêmes substances dans les étoiles filantes et dans les météorites. L'une des plus récentes contenait du charbon, corps dont la présence, ainsi que nous l'avons dit, a été reconnue dans les comètes. Les pierres météoriques se relient donc aux étoiles filantes; il est certain que ce sont des masses étrangères au globe terrestre, et probablement aussi à notre système planétaire.

L'analyse chimique des gaz faite tout dernièrement au spectroscope par M. Wright a prouvé que, dans les aérolithes, on a les mêmes substances et les combinaisons hydrogénées que le spectroscope a constatées dans les comètes. Ce fait relie ensemble les comètes, les aérolithes et les étoiles filantes.

6° Il reste à expliquer comment et pourquoi ces apparitions reviennent périodiquement à des dates fixes, comment elles peuvent être visibles pendant plusieurs années et subir les intermittences que nous avons signalées.

Jusqu'à présent, les astronomes regardaient les étoiles

filantes comme ayant une origine planétaire ; on supposait qu'elles formaient des anneaux circulant autour du Soleil dans des orbites elliptiques presque circulaires, avec une vitesse comparable à celle de la Terre. Le professeur Schiaparelli, frappé de leur vitesse, qui suppose une orbite parabolique, ainsi que nous l'avons fait remarquer, soupçonne qu'elles ont, aussi bien que les comètes, une origine étrangère à notre système. Exposons brièvement sa théorie.

Supposons une masse nébuleuse ou formée de corpuscules quelconques, située à la limite de la sphère d'action de notre Soleil, et qui, douée d'un faible mouvement relatif, commence à ressentir l'attraction solaire; son volume étant très-considérable, ses points sont situés à des distances très-différentes. De là il résulte que, lorsqu'elle commencera à tomber vers le Soleil, les points inégalement distants acquerront avec le temps des vitesses inégales. Malgré ces différences, le calcul prouve que les distances périhélies des différents corpuscules seront très-peu modifiées, et les orbites seront tellement semblables, que les molécules se suivront l'une l'autre, formant une espèce de chaîne ou de courant qui emploiera un temps extrêmement long à passer autour du Soleil. Une masse dont le diamètre serait seulement égal à celui du Soleil emploierait plusieurs siècles à exécuter ce mouvement. Ce courant représentera physiquement et visiblement l'orbite des corpuscules météoriques, comme un jet d'eau représente la trajectoire parabolique de chaque molécule comme projectile isolé.

Si, dans son mouvement de translation, la Terre vient à rencontrer cette espèce de procession de corpuscules, elle passera à travers, et un certain nombre d'entre eux la rencontreront, leur vitesse propre se combinant avec celle du globe terrestre. Si la chaîne est très-longue, la Terre la tra-

versera ainsi chaque année au même point, rencontrant à chaque passage des corpuscules différents de ceux qui s'y trouvaient l'année précédente. Il est alors facile de calculer la position de ce courant, car son rayon vecteur est donné par la distance qui existe entre la Terre et le Soleil au moment de la rencontre; la longitude de la Terre à la même époque donne la longitude de l'un des nœuds, et, comme l'orbite est parabolique, on pourra en déterminer les éléments par les procédés qu'on emploie pour l'orbite des comètes.

M. Schiaparelli a fait ces calculs pour les deux courants d'août et de novembre, et, chose étonnante, il a trouvé que deux comètes très-connues ont des orbites coïncidant précisément avec cette chaîne de météores. La première est la grande comète II de 1862, qui passa au périhélie le 23 août de la même année, et dont la révolution est de cent trente-deux ans. Son orbite coïncide avec celle des météores du mois d'août. La seconde est celle de Tempel, qui parut en 1866, dont la période est de trente-trois ans, et qui fait partie des météores de novembre.

Ce résultat inattendu a jeté une grande lumière sur la nature non-seulement des aérolithes, mais des comètes elles-mêmes. On peut en conclure que ces astres ne sont que de grandes étoiles filantes, ou plutôt des amas de météores dérivés de masses nébuleuses étrangères à notre système planétaire; il est donc bien vrai, comme nous l'avions dit jadis, qu'une comète, en rencontrant la Terre, produirait simplement l'aspect d'une pluie d'étoiles filantes.

On pouvait opposer à cette identité que l'analyse spectrale des comètes montre qu'elles sont formées, au moins en partie, de matière gazeuse, tandis que les étoiles filantes doivent être solides, mais le spectroscope même a résolu cette difficulté. En effet, outre que ces matières pierreuses peuvent

être enveloppées par une atmosphère gazeuse et nébuleuse à laquelle on peut attribuer le spectre cométaire, l'analyse spectrale prouve que leur masse contient une grande quantité de gaz cométaires dans leurs pores, gaz qui se développent par la simple application de la chaleur même très-modérée. Enfin on a constaté que plusieurs météorites contenaient du charbon, comme celle du Cap et celle d'Orgueil. Or cette substance a pu se vaporiser lors du passage de la comète au périhélie et donner le spectre observé. La multitude des noyaux dans certaines comètes est encore favorable à cette hypothèse. Telle était celle découverte par nous dans la constellation du Lièvre, en 1853, celle observée par Hevelius et plusieurs autres.

M. Stanislas Meunier, en analysant un grand nombre de météorites, a trouvé que leur constitution chimique était parfaitement analogue à celle de certaines roches volcaniques terrestres, à cela près qu'il y manquait l'eau ou l'élément d'hydratation. Ce résultat est très-intéressant, en ce qu'il prouve des conditions de formation différentes de celles des matériaux terrestres. En déshydratant nos minéraux volcaniques, on obtient des combinaisons météoriques. Le charbon rencontré dans ces météorites est aussi dans des conditions physiques particulières.

Les courants de matières météoriques peuvent d'ailleurs être discontinus, ou embrasser un arc limité ; ainsi s'expliqueraient facilement les interruptions qui caractérisent certaines apparitions, celle de novembre par exemple. Des courants étrangers, une fois introduits dans notre système solaire, pourraient bien y être retenus par l'action perturbatrice des planètes, qui leur ferait alors parcourir une courbe fermée : ainsi s'expliqueraient les apparitions qui se renouvellent régulièrement chaque année.

Pour qu'un de ces corpuscules météoriques produise une étoile filante, il n'est pas nécessaire que sa masse soit très-grande : on calcule que 1 gramme de matière combustible est plus que suffisant. Cependant un grand nombre d'étoiles filantes doivent avoir une masse considérable, car leurs traînées laissent parfois des nuages d'une grande étendue; par conséquent, la masse qui constitue une comète serait beaucoup plus considérable. Dans le cas des comètes à noyau multiple, il pourrait bien se faire que chaque noyau fût capable de produire une ou plusieurs étoiles filantes. Le volume des comètes est quelquefois si vaste, que la Terre, en les traversant, ne ferait dans leur masse qu'une mince trouée.

La théorie de Schiaparelli explique encore quelques phénomènes curieux signalés dans les annales de la Science, par exemple certaines traînées lumineuses vues pendant une nuit seulement, et qui ont passé de l'orient à l'occident, ainsi que des lueurs extraordinaires, ressemblant à des comètes, mais n'ayant qu'une faible durée. Ce n'étaient que de petites comètes ou de grandes étoiles filantes passant très-près de la Terre, sans pénétrer dans son atmosphère, et, par conséquent, sans s'y enflammer. (*Voir* sur ces questions les Mémoires de M. Schiaparelli dans le *Bulletin météorologique du Collége Romain*, 1866.)

On pourrait se demander si les aérolithes eux-mêmes ne sont pas des assemblages d'étoiles filantes. La constitution de certaines pierres météoriques paraît favorable à cette hypothèse, car elles présentent ordinairement une réunion de plusieurs petits noyaux de métal pur (mélange de fer et de nickel), entourés d'autres matériaux oxydés. Chaque grain pèse moins de 1 gramme, et aurait pu composer une étoile filante. Cependant il serait difficile d'admettre la même hypo-

thèse pour les masses météoriques de fer presque pur ou de fer oxydé, qui renferment dans leurs pores de l'hydrogène condensé. On voit là une preuve de la haute température à laquelle ces masses ont été portées; il est probable qu'elles ont fait partie de corps plus considérables et que ce sont, en un mot, des fragments de petites planètes. Cette opinion est rendue probable par la grande ressemblance des pierres météoriques, dont 80 pour 100 ont une structure semblable, étant formées de petits grains de fer chromé, enseveli dans une gangue d'olivine ou de composés silicatés déshydratés.

On conçoit facilement que la même masse puisse, suivant les circonstances, produire une étoile filante ou un aérolithe. Si son mouvement est dirigé en sens opposé à celui de la Terre, la vitesse relative, égale à la somme des deux autres, sera de 70 kilomètres environ, et la résistance de l'air produira un grand dégagement de chaleur. Si la même masse tombe sur la Terre en marchant dans le même sens qu'elle, la vitesse relative sera la différence des deux vitesses absolues, et elle sera beaucoup plus petite, 16 kilomètres au plus, et, la chaleur développée étant moins considérable, la combustion pourra n'être pas complète. Cette opinion est confirmée par la direction suivant laquelle tombent généralement les aérolithes.

Outre les deux comètes indiquées ci-dessus, on en a trouvé quelques autres dont les orbites coïncident avec des courants de météores signalés par les astronomes : par exemple la comète de Biéla accompagne les météores du 20 avril. On attendait le retour de cette comète en octobre 1872 : elle ne parut pas; mais la Terre devait traverser le nœud de son orbite le 27 novembre de la même année. Ce jour-là eut lieu la fameuse pluie d'étoiles filantes dont nous avons parlé. Il résulte de là que, si nous n'avons pas rencontré la tête de

la comète en retard, nous avons au moins traversé le courant qui lui fait suite. M. Klinkerfues, supposant que nous avions traversé la tête, télégraphia à Madras, à M. Pogson, pour l'engager à observer la comète que nous venions de rencontrer, en lui indiquant la place où il la trouverait. M. Pogson découvrit réellement une comète à la place indiquée; malheureusement il ne put faire que deux observations, tandis que, pour constater l'indépendance de la comète et établir par là l'identité avec celle de Biéla, il en fallait trois. Cependant, si la coïncidence ne se rapporte pas à la comète de Biéla, il faut dire que le hasard a été assez curieux. Aussi plusieurs savants considèrent comme démontré que la Terre a réellement traversé la tête de la comète.

Mais il ne faut pas se flatter de trouver une comète pour chaque apparition d'étoiles filantes. Les perturbations des grosses planètes sont très-considérables sur des corps aussi légers, et, depuis tant de siècles que les courants météoriques sont entrés dans notre système solaire, elles ont dû en modifier l'état primitif.

Nous nous trouvons ici en présence d'une nouvelle confirmation de la théorie nébulaire des systèmes solaires, et, si quelqu'un regardait comme gratuite l'hypothèse de masses si considérables mettant plusieurs siècles à passer près de nous, nous lui répondrions qu'il y a dans les vastes espaces du ciel des nébuleuses dont l'étendue est plusieurs millions de fois plus grande que celle de notre système planétaire tout entier. Il n'y a donc aucune difficulté à concevoir que ces masses de matière cosmique circulent autour du Soleil pendant un temps extrêmement long. Pour nous faire une idée du nombre des météores, remarquons que chaque observateur, de la station qu'il occupe, ne peut voir que ceux qui tombent sur une partie très-limitée du globe. Cet espace serait représenté par

une pièce de 1 franc sur un globe ayant 1 mètre de diamètre. Et cependant, dans les nuits du 10 août et du 13 novembre, on en compte plusieurs centaines en une heure à chaque station. Dans la nuit du 27 novembre 1872, en certaines parties du ciel, les étincelles tombantes étaient si petites et si épaisses qu'elles paraissaient des flocons de neige, de sorte qu'on ne les regardait pas sans une certaine frayeur, en considérant les conséquences qu'elles auraient pu avoir pour notre existence si l'atmosphère n'avait pas été là pour nous protéger.

La conclusion est que, outre les corps de dimensions plus considérables, l'espace planétaire est sillonné par une multitude de corps très-petits qui, tantôt isolés, tantôt en essaims, traversent l'espace dans toutes les directions. De plus, le Soleil a sur ces corps une action toute particulière, que nous ne connaissons pas assez et qui semble dépendre de sa force calorifique ou magnétique.

§ III. — *La lumière zodiacale.*

On nomme *lumière zodiacale* une faible lueur ayant la forme d'un fer de lance, que l'on aperçoit le long du zodiaque, lorsque le temps est pur, le soir, à la fin du crépuscule, et le matin avant l'aurore (*fig.* 267). Dans les régions méridionales, cette lumière s'élève quelquefois jusqu'à une grande hauteur, mais elle atteint rarement le zénith. Son intensité et son étendue sont loin d'être constantes : elle paraît plus vive au couchant entre février et mars, à l'orient entre septembre et octobre. A l'équateur, on la voit toute l'année, elle y atteint une vivacité dont nous n'avons pas l'idée et traverse quelquefois tout le ciel. Les variations annuelles qu'elle éprouve sous

nos latitudes dépendent évidemment de la position de l'écliptique par rapport à l'horizon. Plusieurs observateurs affirment que, même à minuit, ils la voient encore dans la partie du ciel qui est opposée au Soleil; M. Heis nous en a donné l'assurance. Nous n'avons jamais été dans des conditions fa-

Fig. 267.



vorables pour faire cette observation, car l'éclairage au gaz de la ville de Rome la rend extrêmement difficile.

Cette lumière est dépendante du Soleil; elle le précède et le suit constamment. Elle enveloppe les orbites de Mercure et de Vénus; elle enveloppe aussi la Terre, si l'on doit ajouter foi aux observations d'après lesquelles elle dépasse le zénith. Même chez nous, il n'est pas rare que le sommet s'éloigne à plus de 90 degrés du Soleil. Sa forme n'est que la figure d'un ellipsoïde très-aplati, vu par sa tranche. Cet ellipsoïde cepen-

dant n'est pas régulier, car il présente souvent la forme d'une corne recourbée au sommet, et n'a pas la même dimension dans les deux directions diamétrales, car, lorsqu'il est long le soir, il est court le matin, et *vice versa*. Ainsi il paraît avoir trois axes inégaux. Selon M. Houzeau, le plan principal de l'ellipsoïde ne coïncide pas avec l'équateur solaire, mais plutôt avec l'écliptique.

On a beaucoup discuté sur l'origine de cette lumière. L'opinion la plus accréditée veut qu'elle soit une continuation de l'atmosphère solaire; mais sa matière doit être dans un état de raréfaction extrême, car, malgré son épaisseur de près de 100 millions de lieues, elle est assez transparente pour nous laisser voir de très-petites étoiles, et elle ne produit pas de résistance sensible au mouvement de Vénus et de Mercure.

Dans cette hypothèse, ce serait une continuation de l'atmosphère qui, pendant les éclipses, donne lieu au phénomène de la couronne. Mais pourquoi ne la voit-on pas pendant les éclipses? On peut répondre que, la lumière atmosphérique ayant alors un éclat supérieur à celui de la pleine Lune, la lumière zodiacale doit être complétement effacée par elle. Quelques savants, tout récemment, y ont voulu reconnaître un phénomène terrestre, mais à tort selon nous : leurs observations incomplètes ou incertaines ne nous ont pas convaincu. La plupart des savants pensent que ce phénomène est dû à une matière météorique, étoiles filantes et matière cométaire, qui se dirige vers le Soleil. Nous avons vu, en effet, que la matière des comètes se disperse lentement dans l'espace, et elle doit sans doute se diriger peu à peu vers le centre général d'attraction. M. Roche la croit un reste de la nébuleuse primitive. En tous cas, il est sûr qu'elle s'étend jusqu'au corps solaire.

Nous pouvons appuyer cette conclusion par un fait auquel les astronomes n'ont pas prêté assez d'attention. On sait que la comète de 1843, au mois de mars, passa très-près du corps solaire, jusqu'à se trouver plongée dans son atmosphère : or, le jour où la comète parut, à côté de l'immense queue brillait la lumière zodiacale d'un éclat extraordinaire et d'une couleur décidément rouge. Nous la vîmes à Loreto, et M. Cooper à Nice, d'une intensité frappante. Cet éclat venait sans doute de l'agitation causée dans l'atmosphère solaire par cet hôte étranger. Cela prouverait donc que cette lumière n'est que l'atmosphère solaire, et non pas un anneau détaché, comme on l'a quelquefois supposé. Mairan, au siècle dernier, croyait que l'atmosphère du Soleil, se mêlant à celle de la Terre, produisait la lumière zodiacale et les aurores boréales; mais on ne peut plus soutenir cette théorie, car on sait maintenant que les aurores boréales sont des phénomènes électriques, qui s'accomplissent dans l'atmosphère terrestre, et qui au nord descendent très-bas, jusqu'à s'interposer entre l'observateur et les montagnes et à subir l'influence du vent (Parent, *Voyage au Pôle*, Struve et d'autres).

Il y aurait cependant lieu de voir si la lumière zodiacale n'a pas de relations avec le magnétisme terrestre ou avec la période décennale des taches solaires. Si le Soleil exerçait une action immédiate et assez considérable sur ce phénomène, on aurait une donnée précieuse pour le relier aux phénomènes magnétiques qui s'accomplissent dans les espaces célestes. Mais il ne paraît pas qu'on ait, jusqu'à présent, rien constaté qui justifie ce rapprochement (Heis).

On a annoncé que cette lumière avait le spectre de l'aurore boréale, et que la deuxième raie de la couronne solaire était

identique à cette même raie ; mais les observations de Piazzi Smyth, à Palerme, les nôtres à Rome et celles de Arcimis à Cadix prouvent que le spectre de la lumière zodiacale n'est pas formé de raies monochromatiques dans le sens rigoureux du mot. Il est constitué par une bande vert bleu, notablement diffuse, et seulement un peu plus tranchée du côté moins réfrangible et n'a aucune relation ni avec celui de l'aurore boréale ni avec la raie 1474 de Kirchhoff. Il est semblable à toutes les lumières bleuâtres et faibles comme celle des animaux phosphorescents. Celles-ci, renforcées et analysées avec attention, donnent des teintes plates et un spectre continu; mais, comme nous ne pouvons renforcer la lumière zodiacale, nous ne pouvons rien dire de plus. Ce qui est certain, c'est que la bande de son spectre ne peut nullement se confondre avec la raie de l'aurore boréale, et peut-être M. Respighi et M. Angström ont-ils été trompés par une aurore diffuse qui accompagnait la lumière zodiacale. Il sera désormais intéressant d'étudier si cette lumière devient plus vive aux époques des éruptions solaires et de grande activité. M. Tacchini le croit, mais cela demande confirmation.

Voilà donc un champ de recherches assez vaste, et nous ne l'épuiserons qu'après de longues et patientes observations. Ces travaux n'offrent pas de difficultés sérieuses, mais ils demandent de l'attention et de la persévérance.

Pour conclure, nous voyons que la formation de notre système solaire est liée à l'état actuel du Soleil, que les planètes faisaient autrefois partie de la même masse nébuleuse, que les comètes sont des hôtes étrangers à cette formation, et qu'elles constituent une même famille avec les bolides ou étoiles filantes. Toutes les parties de notre monde planétaire auraient donc une origine commune, et le système tout entier

serait en communication avec les systèmes étrangers par l'intermédiaire des comètes et des étoiles filantes.

Nous aurions bien des choses à ajouter sur ce sujet important, si nous ne craignions pas de sortir de notre cadre; contentons-nous de renvoyer encore une fois à notre *Tableau du système solaire*, ainsi qu'aux Mémoires si remarquables de M. Schiaparelli.

LIVRE VIII.

LES SOLEILS OU LES ÉTOILES.

CHAPITRE UNIQUE.

§ I. — *Rapports de notre Soleil avec les étoiles.*

Le Soleil qui nous éclaire n'est qu'une des nombreuses étoiles qui peuplent les espaces célestes, n'ayant rien qui le distingue de ces astres, si ce n'est la distance, relativement insignifiante, qui nous sépare de lui. S'il se trouvait transporté à la distance des étoiles les plus voisines de nous, c'est à peine si nous pourrions, à l'œil nu, l'apercevoir comme une étoile de 5e ou 6e grandeur; son diamètre serait tout à fait insensible, car de Neptune déjà il ne sous-tend qu'un angle de 64 secondes, et les étoiles les plus voisines de nous sont à des distances infiniment plus grandes. Même en supposant leur parallaxe annuelle égale à 1 seconde, leur distance serait au moins égale à 206 265 fois le demi-grand axe de l'orbite terrestre; mais elle est en réalité beaucoup plus considérable, puisque les parallaxes annuelles les mieux connues n'atteignent pas 1 seconde. Et cependant, à la distance supposée, la lumière emploierait trois ans quatre-vingt-trois jours à nous arriver. Elle emploie dix ans à franchir l'espace qui nous sépare de l'étoile 61 du Cygne, dont la pa-

rallaxe est 0″,34 d'après Bessel (0″,52 d'après Auwers), tandis que, pour arriver du Soleil à la Terre, il lui suffit d'un demi-quart d'heure ($8^m 17^s$).

Ces éléments peuvent donner une idée de l'immensité de l'espace sidéral, et montrer comment les astres sont assez éloignés les uns des autres pour que les différents systèmes soient indépendants dans leur action. L'étoile qu'on regarde comme la plus voisine de nous ne saurait agir d'une manière appréciable sur la planète la plus reculée du centre d'action, c'est-à-dire sur Neptune, car elle en est 7800 fois plus éloignée que le Soleil, et comme l'action varie en raison inverse du carré de la distance, en supposant que les deux centres d'attraction aient des masses égales, l'étoile agira sur Neptune avec une force 60 millions de fois plus faible que celle du Soleil. Jusqu'à présent l'étoile qu'on regarde comme étant la plus voisine de notre système est α du Centaure, étoile double de l'hémisphère austral, dont la parallaxe serait 0″,88 [1], et la distance 234000 fois la distance de la Terre au Soleil, et 7800 fois celle de Neptune.

Les étoiles qu'on appelle communément *fixes* ne sont pas absolument immobiles. Les observations ont prouvé qu'elles possèdent toutes des mouvements propres, toujours très-petits à nos yeux, mais très-sensibles pour les astronomes; il en est qui décrivent des arcs de plusieurs secondes dans une année, et d'autres qui se transportent de quelques secondes seulement en un siècle, et cependant il n'en faudrait pas davantage pour changer avec le temps la face du ciel et la forme actuelle des constellations. Ces mouvements sont composés : 1° du mouvement particulier de chaque étoile;

---

(1) Ce nombre est déduit des observations de Maclear, Mœsta et de quelques autres astronomes.

2° d'un mouvement systématique étranger qui s'explique parfaitement en supposant que notre Soleil, avec son cortége de planètes et de satellites, est animé d'une translation qui l'emporte vers un point de la constellation d'Hercule ayant pour ascension droite 259° 30′ et pour déclinaison au nord 32 degrés environ. Ce mouvement est sans doute curviligne, mais il nous est impossible d'en constater la courbure, d'étudier la trajectoire qu'il décrit et de déterminer le centre où réside la force à laquelle est dû ce mouvement. Les astronomes, jusqu'à ces derniers temps, n'avaient, pour mesurer ces déplacements, que les mouvements propres, qui ne permettaient de déterminer que le transport latéral des étoiles. A présent le spectroscope leur fournit un moyen direct d'apprécier aussi la variation de distance. Nous avons déjà dit (page 121) comment, par le déplacement des raies spectrales, on a réussi à reconnaître si les matières éruptives du Soleil sont lancées vers l'observateur ou en sens opposé. M. Doppler, en 1841, essaya d'appliquer ce principe au mouvement des étoiles en faisant observer que le changement des couleurs des étoiles pouvait être un critérium pour juger de leur translation dans l'espace. En effet, si l'étoile se dirigeait vers l'observateur, toutes les ondes subissant un raccourcissement relatif, la couleur devait marcher vers le violet; au contraire, si l'étoile s'éloignait, elle devait tourner au rouge. Cependant ce raisonnement supposait tacitement qu'au delà du rouge et du violet il n'y avait pas d'autres ondes qui pouvaient prendre la place de celles qui devenaient insaisissables par suite du mouvement. Or, comme ces ondes existent, l'idée de Doppler n'admettait pas cette application. Nous en fîmes la remarque en 1865, tout en faisant voir que, si au lieu des couleurs on fixait les raies de Fraunhofer, rapportées aux sources de lumière terrestres, on

pouvait tirer du même principe des résultats rigoureux et constater le mouvement propre de l'étoile dans le sens du rayon visuel (*voir* les *Comptes rendus*, t. LXIII, p. 623). Ce principe a été cependant depuis mis en doute par des autorités compétentes, de sorte que la solution de la question est encore incertaine.

Nous essayâmes cette méthode sur plusieurs étoiles, mais la faiblesse de nos instruments ne nous permit pas d'obtenir un résultat définitif. M. Huggins attaqua ensuite le problème avec des moyens plus puissants, et par le déplacement des raies des étoiles par rapport aux mêmes raies des substances terrestres, il crut constater une vitesse de translation dans plusieurs étoiles. Dernièrement il s'est occupé de nouveau de ce problème, ainsi que M. Vogel et les astronomes de Greenwich. On a trouvé qu'un certain nombre d'étoiles, entre autres Sirius, s'éloignent avec une vitesse de 30 ou 40 kilomètres par seconde, tandis que d'autres, comme Arcturus et Véga, se rapprochent de nous. Quoique ces conclusions ne soient pas encore définitives, nous croyons devoir les rappeler pour faire voir quelle source intarissable de découvertes est le spectroscope pour l'Astronomie.

Dans certains groupes d'étoiles déjà indiquées par nous comme très-remarquables par l'analogie de leur spectre et par la région compacte qu'elles occupent, comme celle de la Grande Ourse, etc., on a reconnu un mouvement semblable et dans la même direction, ce qui fait soupçonner qu'elles forment un même système.

Il semble au premier abord que les grandes étoiles soient distribuées sur la voûte céleste au hasard et sans aucune loi; cependant un examen attentif montre assez facilement qu'elles occupent une zone traversée en son milieu par un grand cercle ayant l'un de ses pôles près de l'étoile Fomalhaut

du Poisson austral. On peut s'en convaincre en disposant un globe céleste de manière que cette étoile corresponde au zénith; l'horizon passera alors par les Hyades, par la ceinture d'Orion, entre Sirius et Canopus; il divisera en deux la Croix du Sud, passera près des luisantes du Centaure et par le corps du Scorpion. En montant dans l'hémisphère boréal, au-dessus de l'écliptique, ce cercle passera entre les luisantes du Serpentaire, traversera la constellation de la Lyre en touchant presque Véga; puis, après avoir passé par Cassiopée et tout près de α de Persée, il laissera la Chèvre à une petite distance. Il traverse la constellation d'Hercule tout près du point vers lequel notre Soleil est emporté avec son cortége de planètes. Ce grand cercle coupe l'équateur par $4^h 45^m$ d'ascension droite, dans la constellation du Taureau près d'Aldébaran, et dans le Scorpion près d'Antarès, par $16^h 45^m$. Cette zone contient presque toutes les étoiles des quatre premières grandeurs. Elle ne coïncide pas avec la voie lactée, mais elle en est très-voisine; elle suit même pendant quelque temps la bifurcation, c'est-à-dire cette branche divergente qui se dirige vers le Scorpion.

Quoiqu'il soit absurde de prétendre fixer le centre de l'univers, nous devons cependant rechercher quels sont les rapports qui existent entre notre Soleil et les nombreux soleils qui brillent à de si grandes distances. Nous analyserons donc brièvement ce qui concerne les étoiles, leur composition et leurs systèmes, afin de nous éclairer de plus en plus sur la constitution de notre Soleil et sur la position qu'il occupe dans l'univers. Nous étudierons également ces masses de matière cosmique, ces nébuleuses qui sont des mondes en voie de formation, et qui passent actuellement par les mêmes phases que notre Soleil a parcourues autrefois.

§ II. — *Rapports de composition entre les Soleils. Spectres stellaires.*

L'analyse spectrale peut nous faire connaître la composition chimique d'un corps de deux manières, comme nous l'avons dit en parlant du Soleil : d'abord par les rayons qu'il émet directement, en second lieu par l'absorption qu'il produit sur les ondes lumineuses. On emploie ces deux procédés dans l'étude du ciel : le second s'applique à la plupart des étoiles ; le premier aux nébuleuses et à un petit nombre d'étoiles. Entrons dans quelques détails historiques sur un sujet de si grande importance.

Le premier qui s'occupa des spectres stellaires fut Fraunhofer, qui, ayant appliqué un prisme d'un angle de 37° 4′ devant l'objectif de son chercheur de comètes de 4 pouces d'ouverture et une lentille cylindrique pour élargir le spectre linéaire des étoiles, examina Sirius, Bételgeuse, Arcturus et les autres étoiles principales, en remarquant que leurs spectres étaient différents en général de celui du Soleil, tandis que la Lune, Vénus et les autres planètes donnaient seulement le spectre solaire. La mort empêcha Fraunhofer d'aller plus loin dans cette voie.

M. Lamont, en possession des instruments de Fraunhofer, répéta et confirma ces recherches en 1838, mais ne put les étendre par défaut de lumière dans l'appareil. Il songea cependant à étudier les spectres stellaires en plaçant un prisme ordinaire près de l'oculaire ; mais les images obtenues ainsi ne sont pas assez précises, car la nappe focale qui se développe par l'intervention du prisme tombe ordinairement dans les cercles de diffraction de l'image focale. M. Lamont attribua le mauvais résultat aux conditions atmosphériques.

De plus, les lignes sont courbes, et le foyer est trop variable d'une ligne à l'autre. L'expérience de M. Lamont resta donc stérile.

En 1855, avec un théodolite garni d'un prisme, nous répétâmes ces observations, et un petit prisme adapté au grand réfracteur de Merz nous fournit un spectre si beau de Sirius, qu'il nous donna envie de poursuivre ces recherches. Mais d'autres occupations nous en empêchèrent.

En 1860, M. Donati, de Florence, reprit ces études, en employant une large lentille collectrice et un spectroscope ordinaire à prisme simple angulaire, où à la fente il avait substitué une lentille cylindrique. Il publia en 1862 la description de plusieurs spectres; mais, à cause du défaut de lumière et de précision dans l'appareil, il ne put faire avancer beaucoup cette branche.

Toutefois ces recherches enrichirent la Science d'abord du spectroscope composé appliqué aux lunettes, ensuite du prisme à vision directe, inventé par Amici, de Modène, qui a été une ressource si précieuse pour ces sortes de travaux.

En 1862, M. Hoffmann inventa son spectroscope de poche, et nous lui en fîmes une demande avec l'intention de l'employer dans les recherches stellaires; pendant que nous attendions l'instrument, M. Janssen en ayant porté un à Rome, nous l'appliquâmes à notre réfracteur de Merz, faisant ainsi les premières recherches avec le savant français, et reconnaissant le sodium dans Bételgeuse. Nous continuâmes ensuite seul ces recherches, qui ont été publiées en 1863.

Dans le *Bull. météor. du Collége Romain* (1863, p. 126), nous donnâmes les premiers aperçus d'une distinction entre les spectres des étoiles blanches et des étoiles colorées, en nous fondant sur les caractères spectraux et non sur les couleurs naturelles ordinaires. Nous modifiâmes successivement

notre instrument, et d'abord nous supprimâmes la fente comme inutile, en employant une lentille cylindrique qui donnait une image linéaire de l'étoile. Ainsi nous construisîmes l'appareil (*fig.* 268), et nous publiâmes les spectres de α d'Orion et α du Taureau, puis de α du Scorpion à une grande échelle. Ensuite nous inventâmes notre spectroscope simplifié (*fig.* 269).

Dans le même temps, M. Huggins aborda en Angleterre, avec M. Miller, l'étude des spectres des étoiles et des nébuleuses, constatant la présence de plusieurs autres raies métalliques outre le sodium, et publia les deux spectres de α du Taureau et de Bételgeuse; ce dernier présentait quelques différences avec notre dessin, que l'on attribua d'abord à une variabilité, mais dont l'origine a été trouvée plus tard dans une méprise commise par le savant anglais dans l'ordre des positions des bandes.

Le spectroscope simplifié de la *fig.* 269 donne beaucoup de lumière et une grande précision d'image. Il ne permet pas, il est vrai, de mesures absolues, ni de comparaison avec les raies des gaz; mais nous réussîmes à obtenir une précision suffisante pour les mesures relatives en profitant de l'image directe de l'étoile vue au-dessus du prisme ensemble avec son image spectrale. Après avoir fixé par le spectroscope ordinaire la position absolue de plusieurs raies dans les étoiles principales, il était facile ainsi d'examiner les étoiles plus petites, et nous pûmes descendre jusqu'à des étoiles de 9e grandeur. Dans un catalogue assez étendu des étoiles jusqu'à la 5e grandeur, publié en 1866, nous confirmâmes la différence des trois types principaux d'étoiles, et l'année suivante nous reconnûmes le quatrième type.

On a attribué cette découverte des types à M. Rutherfurd; mais si ce savant a reconnu indépendamment la diversité

des spectres (chose déjà vue par Fraunhofer), il n'a pas établi les types d'après les caractères propres des spectres, mais seulement d'après les couleurs naturelles, ce qui est bien différent. De plus, pour établir ces types, c'est-à-dire faire voir que *toutes* les étoiles étaient réductibles à ces types, il fallait faire une revue complète des étoiles, et c'est ce que M. Rutherfurd n'a pas fait, mais ce qui a été exécuté par nous. La découverte des types en ce sens nous appartient exclusivement. Elle a été acceptée par les astronomes, et M. d'Arrest a étendu et continué notre travail. Malheureusement les publications italiennes sont très-peu connues à l'étranger, et il se peut bien que les savants aient ignoré nos travaux ([1]).

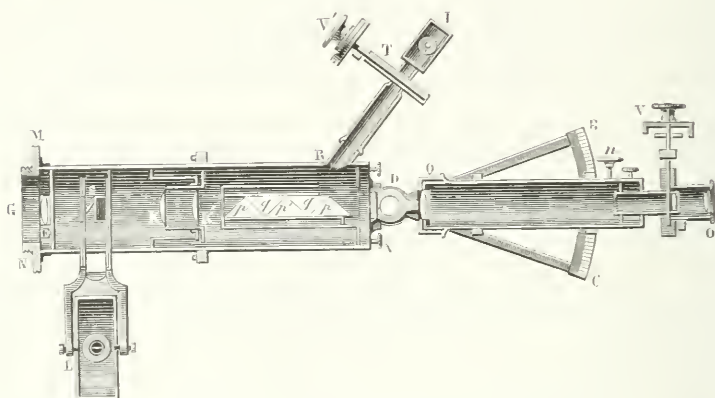
Enfin, après avoir épuisé ces méthodes, et voyant que le champ présentait encore des merveilles à examiner, nous essayâmes la méthode de Fraunhofer, mais d'une manière différente, en employant un prisme d'un petit angle réfringent du diamètre de 6 pouces, que nous avons appliqué successivement à l'objectif de notre grand équatorial de Merz, et à la lunette de 6 pouces de Cauchoix. Les résultats obtenus sont tout ce qu'on pouvait espérer avec un objectif de 9 pouces seulement. Plusieurs autres savants ont plus tard pu disposer de forces plus considérables; M. Rutherfurd, M. Huggins, M. Vogel et M. d'Arrest ont employé des instruments plus puissants et ont réussi à voir des détails intéressants, dont nous profiterons dans ce Chapitre.

Passons maintenant à la description des instruments, omettant toutes les dispositions qui sont identiques à celles du spectroscope solaire. Dans la *fig.* 268, MN est le tube prin-

([1]) Nous insistons sur ce point, car M. Schellen, dans la traduction allemande de notre Ouvrage, a arbitrairement attribué la découverte des types à M. Rutherfurd.

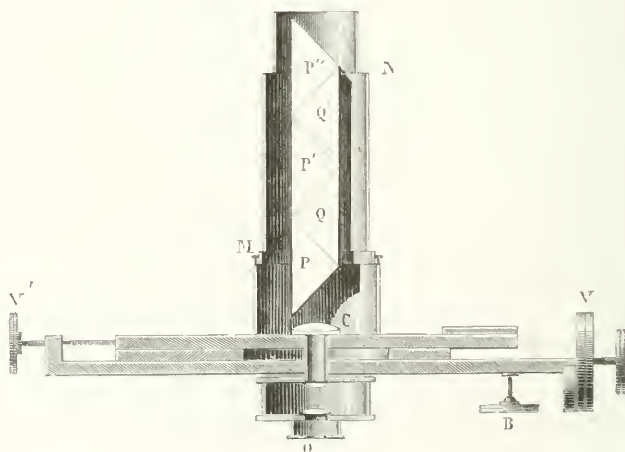
cipal qu'on visse à la lunette par un écrou G. En E est une lentille cylindrique qui produit une image linéaire de

Fig. 268.



l'étoile au foyer S des deux lentilles KK qui constituent le collimateur. QO est la lunette analysatrice et p, q, p',... le

Fig. 269.



prisme intermédiaire à vision directe. La petite lunette porte un micromètre à pointes et est mobile sur un secteur CB

pour examiner les différentes parties du spectre. Cet instrument donne beaucoup plus de lumière que celui à fente, et peut être employé même avec la fente pour les comparaisons de spectres métalliques et gazeux, en plaçant la fente exactement à la place focale de la lentille cylindrique.

Cependant il absorbe beaucoup de lumière, et c'est pour éviter cet inconvénient que nous imaginâmes l'appareil de la *fig.* 269. Il se compose d'un prisme à vision directe PP′ (*fig.* 269), derrière lequel est une lentille cylindrique achromatique C qui forme une image linéaire de l'étoile. On regarde cette image avec un oculaire ordinaire O formé d'une double lentille sphérique, ou mieux d'une double lentille cylindrique dont l'axe est perpendiculaire au plan de dispersion. On conserve ainsi une grande intensité lumineuse, et avec une lunette de 25 centimètres d'ouverture nous avons pu obtenir des spectres très-sensibles des étoiles de 7e et même de 8e grandeur. Les étoiles des premières grandeurs donnent des spectres extrêmement brillants qui permettent de dessiner facilement leurs raies, et d'en mesurer la position avec exactitude. Faisons remarquer en passant qu'on peut parfaitement employer un prisme ordinaire à la place du prisme à vision directe, comme fit M. Lamont, mais alors on rencontre les inconvénients mentionnés ci-dessus.

Mais l'appareil le plus propre à ces recherches est certainement le prisme angulaire d'un faible angle réfringent, que l'on place avant l'objectif, revenant ainsi à l'idée originale de Fraunhofer. Le défaut de son appareil était l'usage d'un prisme d'angle trop grand : un tel prisme dispenserait, il est vrai, de la lentille cylindrique à l'oculaire, car on voit l'image dilatée dans la nappe focale due à la dispersion prismatique, mais il a d'autres inconvénients, parmi lesquels la difficulté de trouver des masses de flint assez grandes et

pures. Notre prisme, fait par M. Merz, est représenté dans la *fig.* 270. La grande armature peut s'adapter au grand réfracteur de 9 pouces comme un couvercle; au centre est monté le prisme de 6 pouces, mobile sur deux tourillons pour qu'on puisse le disposer au minimum de dispersion. La monture est représentée à part, *fig.* 271, et le prisme dans la *fig.* 272.

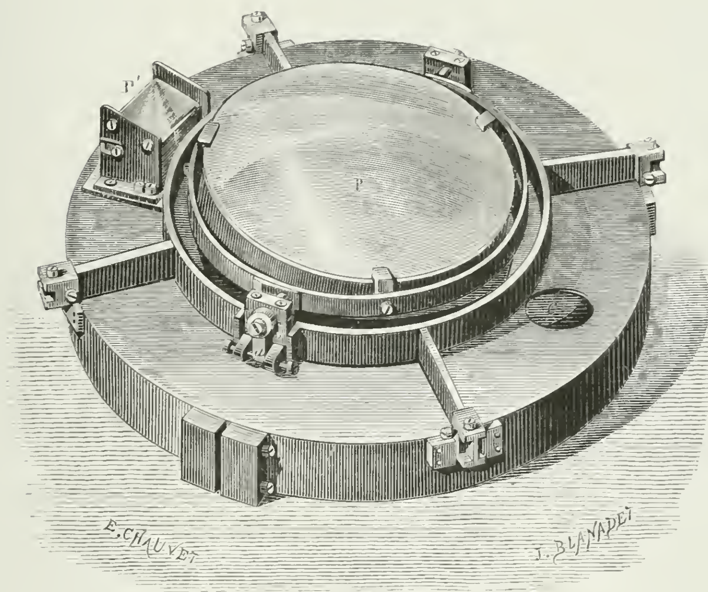
Un petit prisme achromatique P′ est placé de côté pour recevoir l'image directe de l'étoile, mais cet essai n'a pas réussi à satisfaction. Nous avons alors fixé sur la grande lunette un autre chercheur incliné comme à l'ordinaire et disposé de manière que les étoiles se trouvent dans le champ de la grande lunette lorsqu'elles sont au centre de celui du chercheur. L'angle du prisme est d'environ 12 degrés, et la dispersion au foyer de la grande lunette occupe un espace plus large que le diamètre solaire. Nous avons ainsi des spectres très-étalés, même trop, car la lumière est affaiblie. Appliquant ce prisme à une lunette de 6 pouces de diamètre et $2^{m},40$ de foyer, on ne perd rien en lumière et l'on a plus de vivacité, de sorte que l'on peut avoir des spectres magnifiques. La figure que nous avons dernièrement publiée d'α Orion, ainsi obtenue à la lunette de Cauchoix, prouve l'efficacité de ce système. Avec les grandes lunettes on peut employer un angle réfringent plus petit : 5 à 6 degrés sont plus que suffisants pour la longueur focale de 4 mètres, et des angles encore plus petits pour des longueurs plus grandes. On ne se heurtera donc plus à la difficulté d'avoir de larges masses de flint pour de tels primes.

C'est avec des instruments de cette espèce et surtout avec le spectroscope simplifié (*fig.* 269), que nous avons examiné les étoiles principales du ciel et même un assez grand nombre de petites. Cette étude nous a conduit à des résultats intéressants que nous allons résumer le plus brièvement possible.

Considérées au point de vue du spectre qu'elles produisent, les étoiles se rapportent à quatre types parfaitement tranchés ; quelques spectres, peu nombreux, au lieu de se rapporter nettement à l'une de ces catégories, semblent servir d'intermédiaires entre elles.

Le premier type est celui des étoiles blanches, comme Si-

Fig. 270.



rius, Véga, Altaïr, Régulus, Rigel, les étoiles de la Grande Ourse, à l'exception de α, celles du Serpentaire, etc. Toutes ces étoiles, qu'on appelle communément *blanches*, bien qu'en réalité elles soient légèrement bleues, offrent le spectre qui est représenté dans la *Pl. L, fig.* 2. Il est formé de l'ensemble ordinaire des sept couleurs, interrompu par quatre fortes lignes noires, l'une dans le rouge, l'autre dans le vert bleu, les deux dernières dans le violet. Ces quatre raies appartiennent à l'hydrogène ; elles coïncident avec les quatre raies

les plus brillantes que l'on distingue dans le spectre de ce gaz lorsqu'il est porté à une haute température, par exemple dans les tubes de Geissler. Outre ces raies fondamentales et très-larges, on voit dans les étoiles les plus brillantes, comme Sirius, une raie noire très-fine dans le jaune qui paraît coïncider avec celle du sodium, et dans le vert des raies plus faibles qui appartiennent au magnésium et au fer.

La particularité la plus frappante de ce type, c'est la largeur des raies de l'hydrogène, largeur qui tendrait à prouver que la couche absorbante possède une grande épaisseur et qu'elle est soumise à une pression considérable.

Dans les petites étoiles, la raie du rouge est difficile à constater, car la lumière fait défaut; mais, en revanche, la raie du bleu devient quelquefois très-large. En réalité, comme nous l'avons déjà fait observer, ces étoiles ont une teinte bleue, et en effet leurs spectres contiennent peu de rouge et de jaune: c'est le bleu et le violet qui y dominent [1].

Sirius, examiné avec le grand prisme, a montré ses raies considérablement diffuses (*fig.* 273, p. 453) : nous avions, dès le commencement de nos études, constaté cette particularité que la raie F était garnie de deux *battants* : on attribua ce résultat à un défaut de nos instruments. Actuellement il n'est plus question de cette objection. La diffusion des raies est certaine, et elle prouve une pression considérable sous laquelle se trouve le gaz lumineux.

La moitié à peu près des étoiles du ciel se rapportent à ce type; aussi est-il facile de l'étudier, même avec une lunette assez faible.

---

(1) Nous n'avons jamais nié la présence du rouge dans ces étoiles (comme on l'a prétendu par suite d'un malentendu), nous avons seulement dit qu'il y est beaucoup plus faible que dans les autres types.



Fig. 1. (2ème type : Soleil, Pollux, etc.)



Fig. 2. (1er type : Sirius, Vega, etc.).



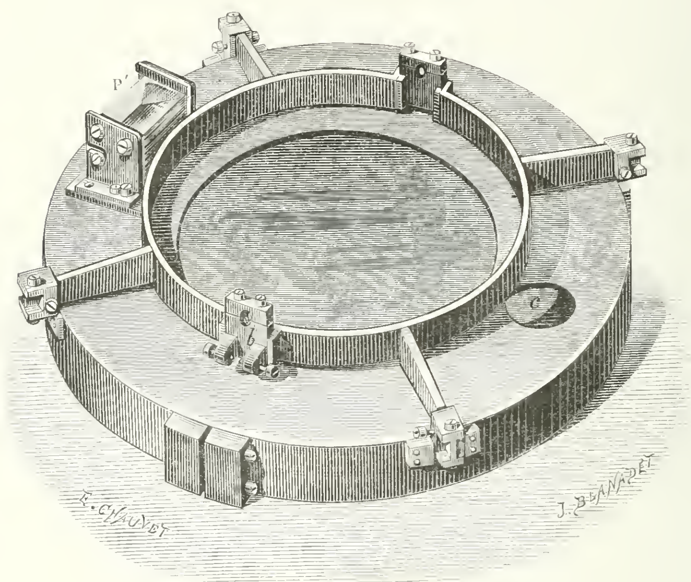
Fig. 3. (3ème type α Hercule, β Pégase, etc.)

Le deuxième type est celui des étoiles jaunes, comme la Chèvre, Pollux, Arcturus, Aldébaran, α de la Grande Ourse, Procyon, etc. Le spectre de ces étoiles est parfaitement semblable à celui de notre Soleil, c'est-à-dire qu'il est formé de raies noires très-fines, très-serrées, et occupant la même position que celles du spectre solaire (*Pl. L, fig.* 1.) Toutes ces étoiles ne sont pas également faciles à étudier. Les raies noires sont extrêmement fines dans le spectre de Pollux et de la Chèvre; elles sont plus larges et plus faciles à reconnaître dans Arcturus et Aldébaran. Cette dernière étoile pourrait même être considérée comme servant de transition entre le deuxième et le troisième type, tandis que Procyon serait intermédiaire entre le premier et le deuxième. Aldébaran, dans les périodes de sa variabilité, lorsqu'elle revêt la couleur rouge, appartient plus au troisième qu'au deuxième type, phénomène important qui nous met sur la voie de l'origine de la variabilité des étoiles rouges. M. Weber a dernièrement annoncé la variabilité de la couleur dans α de la Grande Ourse (voir *The Nature,* t. XV, p. 107). Ainsi cette étoile rentre dans la règle générale.

Nous avons dit que le deuxième type présente les mêmes raies que le Soleil : en étudiant Arcturus, nous avons constaté l'identité de trente d'entre elles choisies parmi les principales. Cette identité est telle que, en l'absence du Soleil, nous n'hésitons pas à employer les raies de ces étoiles pour contrôler les points de repère de nos instruments. Les étoiles du deuxième type ont donc la même composition que notre Soleil, et elles sont dans le même état physique que lui. Plusieurs étoiles jaunes petites paraissent donner un spectre continu, mais cela tient à la finesse des raies et à la difficulté de les distinguer ; lorsque l'air est calme, on les aperçoit facilement avec de bons instruments. Avec le prisme objectif, nous

avons pu résoudre en bandes sombres et brillantes les groupes du vert d'Arcturus et de α d'Orion, et signaler la nébulosité et la diffusion de la raie D dans ces étoiles. M. Huggins assure qu'il a reconnu des raies plus fines qui bordent la raie D dans *cette étoile*. Les persiennes du vert sont comparables à celles que nous avons indiquées déjà dans le spectre des taches solaires.

Fig. 271.



On a vu que le premier type contient à peu près la moitié des étoiles observées jusqu'à présent; les deux tiers de ce qui reste doivent être rangées dans la catégorie des étoiles jaunes dont nous venons de parler.

Le spectre du troisième type est assez extraordinaire; il est composé d'un double système de bandes nébuleuses et de raies noires. On peut prendre comme exemple celui de α d'Hercule (*Pl. L*, *fig.* 3). En réalité, les raies noires fondamentales sont les mêmes que dans le deuxième type, comme

Fig. 1. (3ème type α Orion, Antarès, etc.)

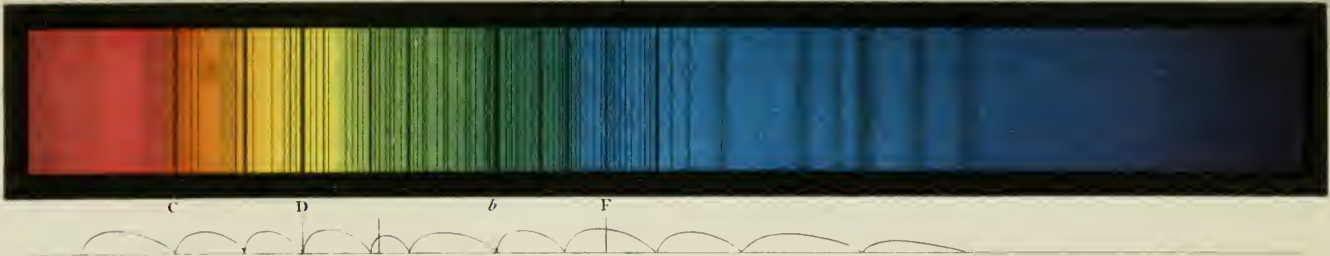


Fig. 2. (4ème type: 152 de Schjellerup.)

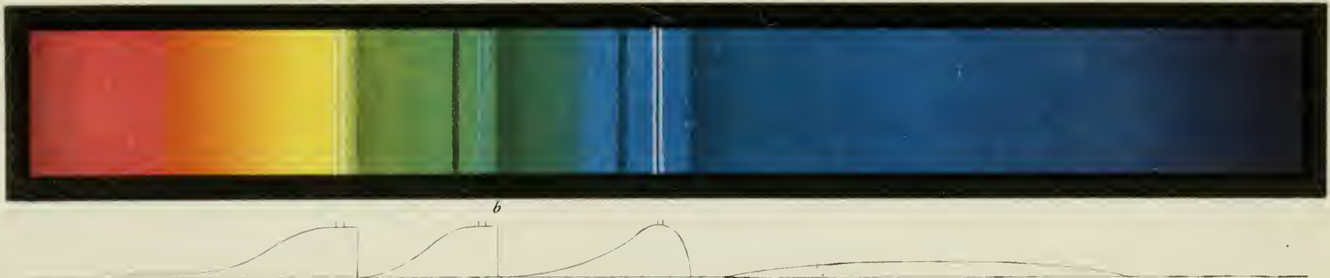
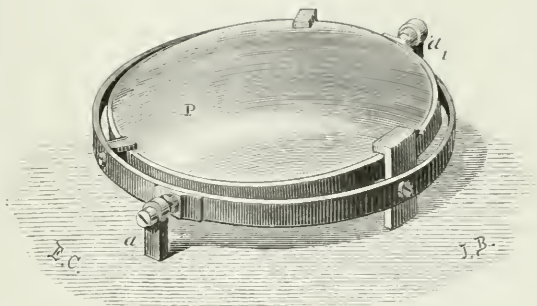


Fig. 3. (4ème type: 78 de Schjellerup.)



on le reconnaît surtout dans Aldébaran et Arcturus ; mais, en outre, le troisième type contient un grand nombre de bandes nébuleuses qui divisent tout le spectre et en font une espèce de colonnade. Ces bandes, dont la largeur et l'intensité sont très-variables, forment pour les étoiles de cette catégorie des différences assez considérables. Nous avons choisi pour type

Fig. 272.



fondamental α d'Hercule, car c'est cette étoile qui offre le spectre le plus régulier. Nous pouvons encore citer β de Pégase, ο de la Baleine, α d'Orion, Antarès, etc. Ces étoiles sont très-remarquables, car elles sont toutes variables, et d'une

Fig. 273.



couleur tirant plus ou moins sur le rouge ou l'orangé ; α d'Orion (*Pl. M, fig.* 1) présente de très-grandes variations dans ses bandes, suivant sa couleur ; ο de la Baleine, cette célèbre étoile qu'on a appelée *la Merveilleuse* (*Mira*), montre de véritables lacunes qui sont très-variables suivant sa grandeur.

Dans quelques étoiles plus petites, au lieu des colonnades, on voit des espaces obscurs qui séparent des groupes de raies

brillantes. Les zones spectrales dépendent donc des variations des étoiles, et ces variations elles-mêmes dépendent de l'action plus ou moins absorbante de leurs atmosphères. L'analyse spectrale des différentes parties du Soleil nous a appris qu'au fond des taches on obtient un spectre plus profondément rayé, et traversé par des bandes noires analogues à celles qu'on voit dans α d'Orion. Nous pouvons conclure de cette remarque que les étoiles dont nous parlons doivent leur spectre à une absorption analogue à celle qui se produit dans les taches du Soleil. Si donc notre Soleil avait partout une couche absorbante, comme il l'a dans les taches, il nous présenterait le même aspect que α d'Orion et les autres étoiles de la même catégorie.

Les belles étoiles de ce type ne sont pas nombreuses; les plus remarquables sont au nombre de trente environ, et, en comptant celles du second ordre, nous en avons trouvé une centaine. M. d'Arrest en a augmenté considérablement le nombre avec son puissant instrument. L'hémisphère austral en contient sans doute d'autres : telle doit être l'étoile rouge et variable appelée η du Navire, et d'autres rouges et jaunes, mais nous n'avons pas encore vu de dessins de ces spectres. Nous reproduisons ici le Catalogue des plus importantes pour guider les amateurs qui voudraient les observer. Lorsque toute autre dénomination fait défaut, le numéro d'ordre est celui du Catalogue d'étoiles rouges de M. Schjellerup.

Catalogue des étoiles principales du troisième type.

NOMS des ÉTOILES.	ASCENSION DROITE, 1870.	DÉCLINAISON.	GRANDEUR.
	h m s	° ′	
ο Baleine.....	2.12.47	+ 3.34,1	Variable.
α Baleine.....	2.55.29	+ 3.34,5	Id.
ρ Persée.......	2.56.51	+ 38.15,1	Id.
Schjell. 44.....	4.45.11	+ 14. 2,0	5
46.....	4.46.36	+ 2.16,7	5,5
59.....	5.24.36	+ 18.29,7	5,5
α Orion........	5.48. 9	+ 7.22,8	1 variable.
67.....	5.50.17	+ 45.55,3	5,6
120.....	9. 2.50	+ 31.29,7	6
nova....	9.17 ±	— 21.42....	1
α Hydre.......	9.21.12	— 8. 5,8	
137.....	10.53. 6	— 15.39,4	6
δ Vierge.......	12.48. 4	+ 4. 6,1	
160.....	13.22.37	— 22.36,4	Variable.
162.....	13.43.13	+ 16.26,6	4
Arcturus.......	14. 9.44	+ 19.52,0	1
178.....	15.30.27	+ 15.32,0	7.5
Antarès........	16.21.27	— 26. 8,5	1
α Hercule......	17. 8.43	+ 14.32,5	2 variable.
nova..	18.14.40	+ 25. 2....	6
234...	19.58.58	— 27.35,7	7,5
254...	21.39.48	— 2.48,8	6,5
β Pégase.......	22.57.28	+ 27.22,7	2
266...	23.00.27	+ 8.42,4	5,5
267...	23.11.44	+ 48.18,3	

Il importe beaucoup de remarquer, pour ce troisième type, que les raies principales qui séparent les colonnades se retrouvent à la même place dans toutes les étoiles. Ce fait a été constaté par un grand nombre de mesures. Les raies les plus saillantes sont celles du magnésium, du sodium et du fer, qui souvent sont diffuses aux bords comme dans les taches du Soleil. On y retrouve aussi celles de l'hydrogène, mais elles ne dominent pas comme dans les deux premiers types. Ce gaz existe donc certainement dans les étoiles de la troisième caté-

gorie : on avait eu tort de le nier ; mais ses raies y sont partiellement renversées, comme cela arrive dans le spectre des taches. La plupart des raies dominantes appartiennent à des métaux qu'on retrouve dans le Soleil.

Le spectre du troisième type est donc le même que celui du Soleil, ou plutôt d'Arcturus, mais profondément divisé par des bandes nébuleuses dues probablement à des oxydes, ce qui fait croire que la température de ces étoiles est moindre que celle de notre Soleil. Nous disons : *plutôt d'Arcturus*, car ces raies sont plus larges que celles du Soleil ; si nous examinons en détail les lignes secondaires, nous verrons qu'Arcturus, pour la partie verte de son spectre, se sépare du Soleil et des étoiles du deuxième type, pour se rapprocher de celles du troisième ; c'est pour cela que nous l'avons enregistré dans le Catalogue précédent. Toutes ces particularités sont plus ou moins tranchées, selon la couleur plus ou moins rouge de l'étoile, et, lorsqu'elle est franchement rouge, elle présente des traces de bandes comme Aldébaran. Notons encore en passant que ces différences sont précisément celles qu'on observe dans les noyaux des taches ; les spectres que nous étudions actuellement nous rappellent en tout les spectres des taches solaires ; aussi sommes-nous de plus en plus autorisés à penser que les étoiles du troisième type et celles du deuxième diffèrent uniquement par l'épaisseur de leurs atmosphères, et par le défaut de continuité dans leurs photosphères ; elles auraient donc des taches variables comme celles du Soleil, mais dont les dimensions seraient incomparablement plus grandes, ou même très-probablement elles sont enveloppées d'une couche générale plus absorbante et moins chaude.

Le quatrieme type est encore plus extraordinaire, et il nous avait échappé d'abord, car il comprend de petites étoiles de couleur rouge de sang qui sont assez peu nombreuses. Leur

spectre (*Pl. M, fig.* 2) ([1]) contient trois zones fondamentales, jaune, verte, bleue. Ces zones ne peuvent pas se réduire à celles du type précédent par la suppression alternative d'une bande nébuleuse ; car, quoique plusieurs lignes noires coïncident assez bien, la distribution de la lumière est tout à fait différente : quelques-unes ont encore une trace de zone rouge, mais cette couleur très-sombre est difficile à constater ([2]).

Dans le troisième type, la lumière est plus vive dans les colonnes du côté du rouge, tandis qu'ici elle est plus vive du côté opposé, c'est-à-dire du côté du violet. Cette différence est fondamentale, et il semble que l'un des deux spectres soit le *négatif* de l'autre. C'est pour cela qu'au-dessous des figures colorées nous avons ajouté des courbes indiquant par leurs ordonnées l'intensité lumineuse. On remarque encore parfois des lignes brillantes très-vives (*Pl. M, fig.* 2, 3). Ces spectres peuvent offrir des différences très-grandes dans leurs détails; nous donnons comme exemple le spectre d'une étoile assez remarquable par les lacunes qu'elle présente dans le rouge et dans le jaune (*Pl. M, fig.* 3), et il nous serait facile de multiplier ces figures.

Les étoiles de ce type ne sont pas nombreuses; nous en avons trouvé une trentaine, et nous donnons le Catalogue des plus remarquables. Comme elles sont toutes très-petites, il est probable qu'on en découvrira un plus grand nombre en employant des instruments plus puissants. M. d'Arrest, ayant continué ces recherches, en a ajouté effectivement un certain nombre. *Voir* pour cela le catalogue des étoiles colorées que

---

([1]) Je ne conçois pas comment ce type manque dans la traduction de M. Schellen. Il faut absolument l'ajouter; je ne m'étais pas aperçu de l'omission.

([2]) M. Huggins a assigné un spectre, différent selon lui, aux étoiles de ce type: mais toute la différence se réduit à étendre la zone du rouge.

nous venons de publier dans les *Mémoires de la Société des spectroscopistes italiens*, année 1876.

Catalogue des étoiles principales de quatrième type.

NUMÉRO du CATALOGUE de Schjellerup.	ASCENSION DROITE, 1870.	DÉCLINAISON.	GRANDEUR.
	h m s	° ′	
41	4.37.47	+ 67.56,0	6 belle.
43	4.43.23	+ 28.18,0	8
51	4.58.41	+ 0.59,8	6
78	6.27.36	+ 38.32,8	6,5 belle.
89	7. 1.59	— 11.43,5	7,5
124	9.45. 4	— 22.24,6	6,5
128	10. 6.12	— 34.40,9	7
132	10.31. 9	— 12.42,6	6 belle.
136	10 45.18	— 20.33,7	6,5
152	12.39. 1	+ 46. 9,0	6 superbe.
159	13.19.52	— 12. 1,8	7,5
163	13.47 39	+ 40.58,8	7
229	19.26.10	+ 76.18,1	6,5
238	20. 9.30	— 21.42,9	6
249	21.26. 3	+ 51. 0,7	9
252	21.38.59	+ 37.16,0	8,5
273	32.39.45	+ 2.45,9	6 belle.

Quelques-unes des raies noires, et les plus importantes, coïncident à très-peu près avec celles du troisième type; cependant le spectre, dans son ensemble, se présente comme un spectre direct appartenant à un corps gazeux, plutôt que comme un spectre d'absorption. Si on le considère comme un spectre d'absorption, on trouve qu'il présente le caractère des composés du carbone, tels qu'on les obtient en produisant une série d'étincelles électriques dans un mélange de vapeur de benzine et d'air atmosphérique et dans l'arc voltaïque entre les charbons. Les bandes diffuses étant un caractère des oxydes gazeux, il s'ensuivrait

que ces étoiles de troisième et de quatrième type sont riches en oxydes et sont à une moindre température.

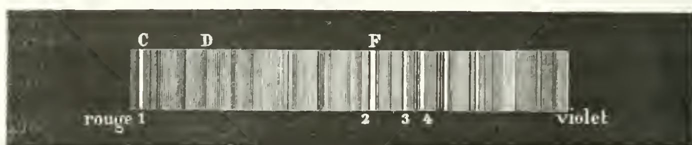
Quoi qu'il en soit, des mesures et des études postérieures pourront faire connaître la nature véritable de ces étoiles; nous n'avons fait jusqu'à présent que les classer en plusieurs types d'après les différences que présentent les rayons lumineux qu'elles nous envoient.

Outre ces quatre types principaux, il y a des groupes d'étoiles qui méritent une attention particulière : tel est celui de la constellation d'Orion; il appartient au deuxième type par l'extrême finesse de ses raies, mais en même temps il est très-remarquable par l'absence presque complète du rouge et du jaune. Nous disons *presque complète,* car ces couleurs existent, mais leur faiblesse est manifeste. C'est à tort qu'on a dit que nous avions nié l'existence du rouge dans ces étoiles (peut-être M. Huggins a-t-il été induit en erreur par la manière trop absolue dont s'exprime M. Schellen dans sa traduction); de sorte que toutes les étoiles de cette région présentent un double caractère : 1° elles ont une teinte verte très-prononcée; 2° les raies de leurs spectres sont si fines, qu'il est souvent difficile de les séparer. Au contraire, la région de la Baleine et de l'Éridan renferme un très-grand nombre d'étoiles jaunes. Cette distribution ne saurait être l'œuvre du hasard : elle dépend sans doute de la nature et de l'état des substances qui remplissent les différentes parties de l'Univers. M. Huggins vient de découvrir que, dans certains groupes, comme par exemple dans celui de la Grande Ourse, le déplacement des raies dû au mouvement des étoiles a lieu dans un même sens, pour celles du premier type, tandis qu'il marche en sens opposé pour α, qui est du deuxième type, ce qui prouve l'indépendance des systèmes et la connexion de leurs membres, comme nous l'avions déjà conjecturé.

Il y a une exception très-singulière formée par une cinquième classe d'étoiles très-peu nombreuses, qui nous donnent le spectre *direct* de l'hydrogène. La plus remarquable est γ de Cassiopée, qui possède deux lignes brillantes à la place des raies hydrogéniques F et C; celles du violet sont trop faibles pour qu'on puisse les distinguer. On voit aussi dans le jaune une raie brillante qui occupe probablement la même place que la raie brillante D_3 des protubérances solaires; mais les mesures de cette raie sont très-difficiles à exécuter d'une manière précise.

Nous retrouvons encore le même caractère dans β de la

Fig. 274.



Lyre, étoile variable, très-difficile à étudier. Enfin deux étoiles variables et temporaires ont présenté également un spectre direct, mais discontinu, ce qui les distingue des précédentes; l'une d'elles parut en 1866 dans la Couronne ($\alpha = 15^h 53^m,9$; $\delta = +26^\circ 18'$) (*fig.* 274), l'autre est R des Gémeaux ($\alpha = 6^h 58^m,5$; $\delta = 22^\circ 55'$). Ces deux étoiles ont présenté le spectre de l'hydrogène disposé en zones, mélangé avec celui de quelques autres substances parmi lesquelles on distinguait le magnésium. Leur éclat était trop faible, et il a été trop passager pour qu'on ait pu les étudier de manière à obtenir des résultats plus complets. L'étoile temporaire du Cygne $\alpha = 21^h 36^m 50^s$, $\delta = +42^\circ 17'$, a présenté un spectre semblable. Ces spectres accusent évidemment une combustion rapide qui eut lieu sans doute à une époque très-reculée, mais qui se manifeste tardivement à nous à cause de

l'immense distance que la lumière a dû franchir pour parvenir jusqu'à la Terre.

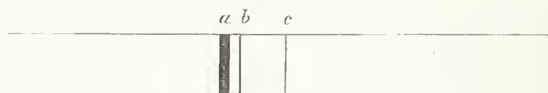
On s'est demandé si Algol appartient au même type que les autres étoiles variables qui sont ordinairement colorées. Nous l'avons étudiée avec soin, et nous avons trouvé qu'elle donne constamment un spectre du premier type, de sorte que ses variations ne tiennent pas à une absorption plus ou moins grande, ni à des taches plus ou moins développées, mais probablement à un corps opaque circulant autour d'elle et produisant des éclipses partielles, ce qui est confirmé par la durée de l'occultation au maximum, qui n'est que de quelques minutes, tandis que les phases de lumière décroissante et croissante durent environ quatre heures, la période entière étant d'environ trois jours.

§ III. — *Spectres des nébuleuses.*

Le spectre des dernières étoiles nous montre quelque analogie avec celui des nébuleuses. Les nébuleuses résolubles, composées d'une grande quantité d'étoiles juxtaposées, ont un spectre stellaire continu. Les nébuleuses proprement dites forment deux catégories : quelques-unes, comme celles d'Andromède et celles de la constellation de la Vierge, ont un spectre continu ; mais la plupart ne donnent qu'un petit nombre de lignes brillantes : telles sont les nébuleuses d'Orion, du Sagittaire, de la Lyre, et toutes celles qui sont connues sous le nom de *planétaires*. La découverte du spectre singulier de ces objets est due à M. Huggins. Avant même de connaître ses résultats, nous avions cependant relevé que le spectre de la nébuleuse d'Orion se réduit à trois raies, l'une *a* (*fig.* 275), dans le vert, est large et brillante ; la seconde *b*,

plus fine, est très-voisine de la première ; la troisième *c* est un peu plus éloignée. En comparant ces raies à celles des gaz, on trouve que *c* correspond à F de l'hydrogène, et que *a* est très-voisine et peut-être identique avec une raie de l'azote. Comme ce dernier gaz présente plusieurs spectres, on a constaté que, pour obtenir la coïncidence, il faut éclairer le tube de Geissler par l'électricité à forte tension, ce qu'on obtient en introduisant un condensateur dans le circuit d'induction. Cependant les dernières recherches de M. Huggins et de M. Vogel prouvent que la raie verte de l'azote est double dans le gaz, mais simple dans la nébuleuse, avec une longueur d'onde égale à la plus longue de 5004. M. Vogel a

Fig. 275.



encore dernièrement constaté la troisième raie de l'hydrogène Hα, dont nous avons vu bien souvent des traces, quoique fugitives. Ainsi la présence de l'hydrogène est mise hors de doute, mais on pourrait contester celle de l'azote.

Toutes les nébuleuses planétaires ont le même spectre ; la raie principale est très-vive ; les raies secondaires le sont moins. Nous présentons au lecteur un certain nombre de ces nébuleuses d'après nos propres observations (*voir*, au frontispice, *Pl. J*, n°s 1, 2, 3, 4 et *Pl. K*, n°s 1, 2). La simplicité de ce spectre fait qu'il est visible très-nettement et qu'il supporte même l'éclairage du champ de la lunette, malgré la faiblesse de la nébuleuse, la lumière se trouvant toute concentrée dans ces quelques lignes. Une circonstance mérite d'attirer toute notre attention. Quelques nébuleuses planétaires semblent offrir des points lumineux : telles sont

celles de l'Hydre (*Pl. J*, n° 3)

($\alpha = 10^h 18^m 22^s$, $\delta = -17° 55' 50''$)

et celle du Sagittaire (*Pl. J*, n° 1)

($\alpha = 19^h 36^m 24^s$, $\delta = -14° 28' 52''$);

et cependant elles donnent des spectres monochromatiques, ce qui prouve que la matière gazeuse qui les compose peut bien se condenser jusqu'à prendre l'apparence d'une étoile, sans pourtant former un corps solide et incandescent. Cependant la nébuleuse planétaire d'Andromède (*Pl. K*, n° 2), qui est réellement une étoile nébuleuse, présente les deux spectres superposés. La nébuleuse annulaire de la Lyre (*Pl. K*, n° 1) donne aussi un spectre linéaire, bien qu'elle apparaisse composée de petits points. La nébuleuse d'Orion fut annoncée comme décomposable par Bond avec le grand réfracteur de Cambridge (États-Unis); mais le spectroscope nous apprend qu'elle est gazeuse. Les amas centraux (voir *Pl. J*, *fig.* 5) ne présentent aucune trace de spectre continu. Au contraire, là où sont les étoiles du *trapèze*, on voit le double spectre. On doit en conclure que ces points ne sont pas de véritables étoiles, mais seulement des masses gazeuses plus condensées.

La théorie que nous avons exposée relativement à la formation du Soleil, que l'on attribue à la condensation successive d'une nébuleuse, n'avait d'abord été admise que sur de simples inductions; elle a été bien confirmée et pour ainsi dire démontrée par la découverte des nébuleuses gazeuses, et tout nous porte actuellement à croire que ces nébuleuses se transformeront un jour en étoiles, et que tous les astres qui brillent maintenant au firmament ont eu une origine semblable. Nous avons fait remarquer que, pour obtenir artificiellement des spectres analogues à ceux de quelques-uns de

ces amas de matière cosmique, nous devons recourir aux modes de dissociation les plus efficaces que nous connaissions, par exemple l'étincelle électrique d'induction rendue plus énergique par l'interposition d'un condensateur; il faut en conclure que cette matière est dans un état extrême de dissociation, et sans doute élémentaire. Nous ne pouvons cependant pas être certains de connaître complétement leur spectre; leur distance est trop grande, leur lumière est trop faible, et nos instruments sont trop imparfaits.

Si une nébuleuse vient à se condenser par l'attraction que ses différentes parties exercent les unes sur les autres, on comprend que ce mouvement produira une quantité de chaleur comparable à celle dont nous avons reconnu l'existence dans le Soleil. Ces masses cosmiques occupent des espaces immenses. La nébuleuse d'Orion, dans sa partie la plus dense, sous-tend un arc de 1 degré, mais son étendue tout entière est bien de 4 degrés. La nébuleuse d'Argus est à peu près aussi grande. De l'autre côté du Sagittaire, nous trouvons de larges surfaces blanches donnant les raies directes, qui doivent être des nébuleuses non résolubles. Il n'est donc pas étonnant que quelques-unes de ces masses se déplacent, traversent notre système planétaire et finissent par entrer dans notre atmosphère en donnant naissance aux comètes et aux étoiles filantes. Cette hypothèse est parfaitement confirmée par le spectre si discontinu que présentent les comètes.

Le monde s'élargit donc à nos yeux; le système solaire ne nous paraît plus que comme un point dans l'espace. Quelle différence entre ces idées si larges et celles qui autrefois limitaient le monde à notre globe! Mais, en reculant les limites du monde, nous ne diminuons pas notre grandeur véritable. Sans doute nous paraissons peu de chose dans cette immensité de l'Univers; mais plus le monde est grand par rapport

à nous, plus il nous faut d'intelligence pour comprendre ces merveilles, plus il a fallu de génie pour les découvrir. Dieu seul peut comprendre parfaitement son œuvre : heureux le mortel qui peut en avoir une idée assez exacte pour en admirer la grandeur et la beauté !

Catalogue des nébuleuses contenues dans les planches J et K

(Extrait du grand Catalogue de J. Herschel)

(1860, 0 janvier).

Planche J.

Fig. 1. — Planétaire du Sagittaire :

H. cat. nº 4510... Æ = $19^h 36^m 24^s$, décl. = — $14° 28' 52''$.

Fig. 2. — Annulaire dans Andromède :

H. cat. nº 2241... Æ = $23^h 19^m 9^s,9$, décl. = + $41° 46' 3''$.

Fig. 3. — Annulaire de l'Hydre :

H. cat. nº 2102... Æ = $10^h 18^m 2^s,2$, décl. = — $17° 55' 50''$.

Fig. 4. — Planétaire de Struve :

H. cat. nº 4390... Æ = $18^h 5^m 17^s,8$, décl. = + $6° 49' 6'',5$.

Fig. 5. — Grande nébuleuse de θ Orion :

H. cat. nº 1179... Æ = $5^h 28^m 24^s,0$, décl. = — $5° 29' 11''$.

Planche K.

Fig. 1. — Nébuleuse annulaire de la Lyre :

H. cat. nº 4447... Æ = $18^h 48^m 20^s$, décl. = + $32° 51' 3''$.

Fig. 2. — Étoile nébuleuse :

H. cat. nº 4514... Æ = $19^h 41^m 7^s,5$, décl. = + $39° 49' 42''$.

Fig. 3. — Étoile nébuleuse :

H. cat. nº 1532... Æ = $7^h 20^m 54^s,4$, décl. = + $21° 11' 27''$.

Fig. 4. — Nébuleuse elliptique dans le Renard, appelée *Dumb-bell* (haltère) par les Anglais :

H. cat. n° 4532... Æ = $19^h 53^m 29^s,3$, décl. = + 22°20′ 17″.

Fig. 5. — Spirale dans les Chiens de chasse (spectre non gazeux) :

H. cat. n° 3572... Æ = $13^h 23^m 55^s$, décl. = + 47°54′ 56″.

Fig. 6. — Nébuleuse en forme d'écrevisse dans le Taureau :

H. cat. n° 1157... Æ = $5^h 26^m 3^s,9$, décl. = + 21°54′ 40″.

Fig. 7. — Nébuleuse double, ou plutôt quadruple :

H. cat. n° 1567... Æ = $7^h 35^m 41^s$, décl. = — 17°53′ 22″.

Fig. 8. — Figure d'une nébuleuse elliptique. Elles sont très-nombreuses. Celle d'Andromède est placée :

H. cat. n° 116... Æ = $0^h 35^m 3^s,9$, décl. = + 40°30′ 15″.

Fig. 9. — Nébuleuse double avec étoile au milieu :

H. cat. n° 1520... Æ = $7^h 16^m 44^s,7$, décl. = + 29°45′ 39″.

§ IV. — *Coup d'œil sur la distribution des étoiles dans l'espace.*

Les étoiles sont distribuées en groupes formant des systèmes semblables à celui auquel nous appartenons. Les mêmes lois de l'attraction produisent et régissent le mouvement de ces astres lointains, aussi bien que la circulation des planètes autour du Soleil. Les systèmes les plus simples constituent les étoiles doubles ou triples; ce sont autant de Soleils ayant leurs cortéges de planètes brillantes qui décrivent autour d'eux des orbites elliptiques. Ces planetes ne diffèrent des nôtres qu'en un seul point : elles sont encore incandescentes, et par conséquent lumineuses par elles-mêmes; elles nous éclairent par une lumière qui leur est propre, et non par une lumière empruntée venant se réfléchir à leur surface. C'est cette circonstance qui nous permet de les distinguer à une aussi grande distance, d'observer les positions qu'elles

occupent successivement, et de calculer les orbites qu'elles décrivent.

Ont-elles aussi des satellites obscurs? Il est naturel de le supposer. Les irrégularités observées dans le mouvement propre de Sirius ont fait soupçonner pendant longtemps l'existence d'un astre obscur circulant autour de cette magnifique étoile. Dernièrement on a découvert ce satellite; mais il est lumineux par lui-même, et son éclat égale au moins celui d'une étoile de 6ᵉ grandeur; ce qui en a retardé la découverte, et ce qui le rend très-difficile à apercevoir, c'est l'éclat de l'étoile principale, dont les rayons masquent ordinairement le peu de lumière qu'il nous envoie. A Procyon, on a cru trouver aussi un satellite qui expliquerait les irrégularités du mouvement propre de cette étoile, mais on a dernièrement mis en doute sa réalité.

Une autre étoile, Algol (β de Persée), nous prouve directement l'existence des satellites obscurs, par les variations régulières qu'elle subit, et qui ne peuvent être que des occultations produites par un corps opaque passant devant l'astre lumineux. La période de ces variations est de $2^j 20^h 48^m 58^s$. Pendant $2^j 13^h$, l'éclat est constant, et fait ranger cette étoile parmi celles de 2e grandeur; puis elle commence à pâlir, et, au bout de $3^h 30^m$, elle se trouve réduite au-dessous de la 4e grandeur; elle demeure dans cet état pendant cinq ou six minutes au plus, et elle met à recouvrer son état primitif un temps égal au précédent, $3^h 30^m$. Ces variations sont des phénomènes en tout semblables à nos éclipses; on le supposait depuis longtemps, mais les dernières découvertes spectroscopiques l'ont pleinement démontré, car les variations de cette étoile ne peuvent pas, comme celles de beaucoup d'autres, être attribuées à des changements survenus dans le pouvoir absorbant de son atmosphère.

Il ne suffit pas que deux étoiles paraissent très-voisines pour constituer ce qu'on désigne plus spécialement sous le nom d'*étoile double :* il faut de plus qu'elles soient réellement assez voisines pour s'influencer l'une l'autre par la gravitation et former un système à part. Jusqu'à présent il n'y a qu'une quinzaine de ces systèmes qui soient assez bien connus pour qu'on ait pu déterminer complétement leurs révolutions et calculer les éléments de leurs orbites; mais il y en a un bien plus grand nombre dont on peut affirmer avec certitude la connexion physique. Ainsi, sur 1321 étoiles doubles observées par Struve et revues à l'Observatoire du Collége Romain, on en a trouvé un tiers ayant un mouvement relatif angulaire certain et très-remarquable. Le nombre des systèmes binaires et ternaires ira en croissant avec *le temps*, le seul élément qui manque actuellement aux astronomes, et dont ils ne peuvent pas disposer à leur gré. Il n'y a guère qu'un demi-siècle qu'on a commencé à faire sur ce sujet de bonnes observations, et déjà on a vu plusieurs de ces soleils accomplir une révolution tout entière (ζ d'Hercule, 36 ans; η de la Couronne boréale, 43 ans; ζ du Cancer, 59 ans; ξ de la Grande Ourse, 63 ans). Il y a d'autres étoiles qui emploient un temps plus long à accomplir leurs révolutions. Le compagnon de α du Centaure a une orbite à peu près semblable à celle de la comète de Halley. Comme on connaît la distance de cette étoile, on a pu calculer la masse de ce système, qui n'est guère différente de celle de notre système solaire.

Les *fig.* 276 et 277 représentent les orbites apparentes de ξ de la Grande Ourse et de ζ d'Hercule.

Les systèmes binaires présentent deux particularités remarquables : 1° leurs orbites sont ordinairement très-allongées, ce qui peut conduire à des idées théoriques sur leurs modes de formation; 2° les deux étoiles ont presque toujours des

couleurs complémentaires, ce qui indique une différence de température et un état différent de condensation.

Outre ces systèmes plus simples, il y a des amas globulaires, connus en anglais sous le nom de *clusters,* composés d'une multitude littéralement innombrable de petites étoiles dont la densité croît près du centre d'une manière prodigieuse, sans que cependant ces astres soient gazeux, ni les individus cessent d'être distincts, comme on s'en est assuré par les ob-

Fig. 276.

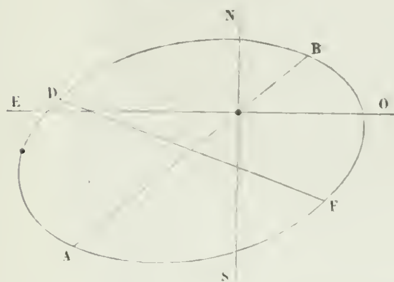
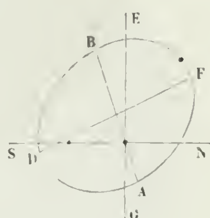


Fig. 277.



servations faites avec le spectroscope. La *fig.* 278 représente celui qui se trouve dans le Verseau, la *fig.* 279 celui des Chiens de chasse. Il est à remarquer que les plus beaux amas globulaires se trouvent dans la zone des grandes étoiles ; il semble que leur formation tient la place d'une de ces grandes étoiles plus voisines de nous.

Enfin il y a, dans le ciel, des groupes d'étoiles qu'il est impossible de ne pas reconnaître comme formant des systèmes d'astres physiquement reliés ensemble, par exemple les Pléiades, le groupe du Cancer, celui de Persée (*fig.* 280). Certains espaces nébulaires très-vastes, comme la Chevelure de Bérénice, les nuées de Magellan, et surtout la Voie lactée.

Nous ne pouvons connaître en détail le mode de groupement de ces amas, ni déterminer le centre autour duquel

s'exécutent leurs mouvements, car il faudrait pour cela de

Fig. 278.



Groupe du Verseau.

Fig. 279.



Groupe des Chiens de chasse.

longues observations qui nous font défaut. Quant à la région plus voisine de nous qui forme la Voie lactée, nous pouvons sonder sa profondeur dans les différentes directions, et nous faire une idée assez exacte de la manière dont les étoiles y sont groupées. Impossible, il est vrai, de résoudre cette question directement, ni d'évaluer la distance des étoiles avec des

Fig. 280.



Groupe de Persée.

unités connues ; mais nous pouvons atteindre le résultat avec une certaine approximation par un calcul de moyenne fondé sur la théorie des probabilités.

Les étoiles, sauf très-peu d'exceptions, n'ont pas de parallaxe sensible, d'où il faut conclure que, vu la distance où elles se trouvent, leur lumière met en moyenne une trentaine d'années au moins à parvenir jusqu'à nous [1]. Nous

---

[1] Nous donnons ici la liste des parallaxes assignées comme probables pour cer-

devons donc renoncer à mesurer leurs distances absolues, et nous contenter d'apprécier leurs distances relatives.

On peut employer trois méthodes pour trouver ces distances relatives : on peut d'abord mesurer l'intensité de la lumière qu'elles nous envoient, ce qui constitue la *méthode photométrique;* on peut, en second lieu, étudier le rapport qui existe entre leurs mouvements propres; on peut enfin se fonder sur le nombre relatif des étoiles contenues dans les classes successives. Ces trois moyens étant indépendants l'un de l'autre et fondés sur des lois géométriques différentes, s'il arrive qu'ils conduisent à des résultats semblables, nous

---

taines étoiles. tout en avertissant que plusieurs sont bien douteuses, et celles au-dessous de 0",2 très-incertaines. Celle de α Centaure est peut-être un peu trop forte (*voir* p. 438).

NOMS ET GRANDEURS des étoiles.	PARALLAXES ANNUELLES.	DISTANCE EN UNITÉS de la distance du Soleil.	NOMBRE D'ANNÉES qu'emploie la lumière pour franchir les distances.
α Centaure (1 à 4)	0",928	222300	3,5
61 Cygne (5 ½ à 6)	0,553	373300	5,9
Lalande, 21185 (7 ½)	0,501	411700	6,5
β Centaure (1)	0,470	439100	6,9
μ Cassiopée (5 ½)	0,342	603100	9,5
Groombridge, 34 (8 ½)	0,307	671900	10,6
La Chèvre (1)	0,305	676300	10,7
Lalande, 21258 (8 ½)	0,271	761400	12,0
OEltzen, 17415 (8 ½)	0,247	835100	13,2
σ Dragon (5)	0,246	838500	13,2
Sirius (1)	0,193	1069100	16,9
α Lyre (1)	0,180	1146000	18,0
70 Ophiuchus (4 ½)	0,162	1273000	20,1
η Cassiopée (4 ½ à 7)	0,154	1339000	21,1
Procyon (1)	0,123	1677000	26,5
Groombridge, 1830 (6 ½)	0,118	1748000	27,6
Polaire (2)	0,091	2267000	35,7

trouverons dans cette concordance une raison très-grave de croire à l'exactitude des conclusions.

L'estime des distances par la photométrie repose sur deux principes : 1° les étoiles ne peuvent être placées toutes à la même distance de nous; 2° les plus éloignées doivent, par cela seul, nous paraître plus petites. Ces principes nous conduiraient même à l'appréciation directe et certaine de leurs distances relatives, si nous pouvions affirmer que toutes les étoiles ont une lumière intrinsèque égale ; mais cette troisième assertion n'est ni prouvée ni probable. Nous devons donc traiter le problème par les méthodes empruntées au Calcul des probabilités. Les résultats auxquels nous parviendrons seront vrais pour l'immense majorité des étoiles, quoiqu'ils puissent se trouver en défaut pour quelques-unes d'entre elles; car, dans la moyenne, les exceptions se détruiront l'une l'autre. Supposons, par exemple, que deux étoiles paraissent être de la même grandeur, tandis qu'elles sont réellement inégales; on attribue à la plus grande une distance trop petite, et une distance trop grande à celle qui a moins d'éclat : il y aura donc compensation.

Avant d'aborder la question en elle-même, les astronomes ont dû résoudre un problème préliminaire : *Étant donnée une étoile d'une grandeur déterminée, de combien devra-t-on augmenter sa distance pour que son éclat diminue d'une unité dans l'ordre des grandeurs?*

La classification qu'on trouve dans tous les Catalogues est complétement arbitraire et de pure convention; aussi n'en peut-on rien déduire tant qu'on n'aura pas mesuré le pouvoir lumineux de chaque ordre, tant qu'on n'aura pas déterminé la loi physique contenue dans cette classification arbitraire, et exprimé numériquement l'intensité relative de la lumière qui caractérise chaque grandeur En employant

des méthodes photométriques très-ingénieuses, les astronomes sont arrivés à cette conclusion : en moyenne, deux étoiles prises dans deux ordres consécutifs de grandeur ont des intensités lumineuses dont le rapport est égal à 2,42. Les étoiles de la 1re et de la 2e grandeur font exception ; car, pour elles, le rapport est 3,75. En prenant la valeur moyenne 2,42, à laquelle répond le rapport des distances 1,55, on a pu calculer les distances auxquelles devrait être placée une étoile de 1re grandeur pour avoir le même éclat que les étoiles de 2e grandeur, de 3e grandeur, etc. Les résultats de ce calcul sont contenus dans le tableau suivant :

GRANDEURS.	DISTANCES.	GRANDEURS.	DISTANCES.
1	1,00	9	34,30
2	1,55	10	53,36
3	2,42	11	83,00
4	3,76	12	129,12
5	5,86	13	200,90
6	9,11	14	312,50
7	14,17	15	486,10
8	22,01	16	756,20

La 16e grandeur contient les plus petites étoiles visibles dans le grand télescope d'Herschel, qui, avec son ouverture de 18 pouces (45 centimètres) en bonne condition de polissage, équivaut en *force pénétrante* à un réfracteur de Merz de 25 centimètres.

Essayons de nous faire une idée des distances absolues de ces étoiles. En supposant une étoile assez éloignée pour que sa lumière mette dix ans à nous arriver, sa parallaxe serait représentée par un tiers de seconde, quantité sans doute exagérée pour les étoiles de 1re grandeur. Alors les plus petites étoiles visibles dans notre réfracteur seraient situées à une si grande distance, que leur lumière mettrait sept mille cinq cent soixante ans à parvenir jusqu'à nous.

Dans le réflecteur de lord Rosse, la limite des distances serait représentée par 2090 unités, et, pour parcourir cette distance, la lumière emploierait vingt mille neuf cents ans.

On a ensuite cherché à déterminer la distance relative des étoiles de différentes grandeurs, d'après l'amplitude de leurs mouvements propres. Struve a fait sur ce sujet un travail très-remarquable auquel nous empruntons les résultats suivants.

GRANDEUR des ÉTOILES.	MOUVEMENT PROPRE EN 100 ANS.			
	ÉTOILES SIMPLES.		ÉTOILES DOUBLES.	
	En ascension droite.	En déclinaison.	En ascension droite.	En déclinaison.
1	34″,2	29″.0	55″,5	47″.9
2	18,2	16,1	30,8	26,1
3	12,2	10,5	20,1	17,0
4	8.7	7.4	14.4	12,0
5	6,3	5,3	10,2	8,6
6	3,7	3,1	6,0	5,1
7	2,2	1,8	3.5	3,0
8	1,4	1,2	2,3	2,0
9	1,0	0,9	1.7	1,5

Ce tableau révèle une circonstance singulière, c'est que les étoiles doubles ont des mouvements plus prononcés La cause de cette singularité réside dans l'impulsion plus considérable que ces systèmes ont reçue à l'origine et qui les a forcés à se diviser en plusieurs parties.

Comme les mouvements apparents sont en raison inverse des distances, on pourra calculer la distance relative des étoiles, en prenant celle de la 1re grandeur pour unité. Le tableau suivant contient la comparaison des résultats obtenus par l'étude des mouvements propres et par la méthode photométrique.

GRANDEUR des ÉTOILES.	DISTANCES CONCLUES		
	PAR LES MOUVEMENTS PROPRES.		PAR LA PHOTOMÉTRIE.
	Étoiles simples.	Étoiles doubles.	
1	1,0	1,0	1,0
2	1,3	1,4	1,5
3	2,1	2,0	2,4
4	3,6	3,2	3,7
5	6,1	5,9	5,8
6	8,5	8,2	9,1
7	12,0	11,6	14,2
8	17,9	17,8	22,0
9	33,3	31,8	34,3

De ce tableau il résulte que la progression est extrêmement semblable de part et d'autre, et l'on ne devait pas s'attendre à un accord plus parfait entre des éléments aussi disparates. Il y a un peu d'incertitude pour les mouvements propres des étoiles des trois dernières grandeurs, et c'est là ce qui explique les différences un peu plus grandes qu'on trouve dans les résultats.

Le troisième moyen d'évaluer les distances relatives des étoiles est fourni par le dénombrement de celles qui forment les classes successives. Mais il faut ici tenir compte de leur distribution dans les diverses régions du firmament. Et ici il faut bien distinguer entre la distribution réelle et la distribution apparente.

Lorsque nous voulons, de la disposition apparente, conclure à la distribution réelle des étoiles dans l'espace, nous quittons le domaine de l'observation et nous entrons forcément dans celui des hypothèses. Or il se présente deux manières de concevoir la distribution réelle d'après celle que présente l'observation . 1° on peut supposer que, si l'on voit

plus d'étoiles dans une direction que dans une autre, cela tient uniquement à leur condensation, la profondeur de la couche restant la même dans tous les cas; 2° on peut admettre, au contraire, que la couche est plus profonde dans une direction que dans l'autre, la densité étant la même de toutes parts.

La solution de cette question demande la connaissance préliminaire de la manière dont les petites étoiles sont distribuées dans le ciel. Ce travail a été fait par les deux Herschel, William pour l'hémisphère nord, et John pour le sud. Il est absolument impossible qu'un homme exécute à lui seul une semblable énumération; elle lui demanderait près d'un siècle de travail soutenu. Pour arriver au résultat, W. Herschel a substitué à l'énumération continue le procédé des *sondes* ou *jauges* (*star gauges*) distribuées sur le ciel d'une manière uniforme. Ces opérations consistaient à compter les étoiles visibles dans un réflecteur de 18 pouces, auquel était adapté un oculaire qui lui donnait un champ de vision égal à 15 minutes. Ces sondes ont donné des résultats extraordinairement différents. Dans quelques endroits, près du pôle de la Voie lactée, on comptait trois ou quatre étoiles à chaque observation, tandis que, dans la Voie lactée elle-même, ce nombre s'est élevé jusqu'à 588.

En discutant ces observations, on est arrivé à quelques conclusions générales que nous allons exposer brièvement.

1° Les étoiles sont d'autant plus nombreuses qu'on approche davantage de la Voie lactée; le maximum a lieu dans le plan de cette nébuleuse, le minimum à ses pôles.

2° Dans la Voie lactée elle-même, l'accumulation est plus grande pour les points voisins de l'Aigle (18 heures d'ascension droite) que dans le voisinage du Taureau (6 heures). D'un côté le maximum est de 557, de l'autre il est seulement de 204.

3° La densité apparente décroît très-rapidement quand on s'éloigne de la Voie lactée. A une distance de 2 degrés, elle est encore très-considérable; à 15 degrés, le nombre d'étoiles correspondant à une *sonde* descend à 56; à 30 degrés, il est de 17; à 45 degrés, il est de 10; entre 60 et 70 degrés, on ne trouve plus que 6 ou 4 étoiles.

4° En calculant d'après ces sondes le nombre des étoiles visibles dans le télescope d'Herschel, on trouve le nombre 20374034. Avec le grand réfracteur de Washington de 26 pouces on trouverait 30 millions.

Ces résultats, confirmés par les travaux de plusieurs astronomes, permettent d'établir avec une assez grande probabilité la loi de la distribution réelle des étoiles dans l'espace. Nous avons dit qu'il y a deux hypothèses possibles. Afin de reconnaître laquelle des deux est la véritable, on a calculé par deux méthodes différentes le rayon de la sphère dans laquelle doivent être renfermées les étoiles de chaque grandeur. Dans un premier calcul, on a supposé la distribution uniforme; dans un autre, au contraire, on a supposé la densité variable. En comparant les nombres ainsi obtenus avec les distances calculées par les deux méthodes précédentes, on choisira l'hypothèse dont les résultats s'accordent le mieux avec les nombres déjà trouvés. Voici le tableau où se trouvent résumés ces calculs :

GRANDEUR des ÉTOILES.	DISTANCES CONCLUES		
	1° De la distribution uniforme.	2° En supposant la densité variable.	3° De la photométrie.
1	1,00	1,00	1,00
2	1,46	1,80	1,55
3	2,13	2,76	2,42
4	2,91	3,90	3,76
5	3,98	5,45	5,86
6	5,46	9,28	9,11
7	8,58	15,78	14,17
8	13,44	23,86	22,04
9	20,38	33,40	34,30
14 (Herschel)	98,00	180,40	312,00

Nous voyons que, pour les plus grandes étoiles, les résultats donnés par l'hypothèse de la distribution uniforme ne sont pas déraisonnables; mais, à partir de la 4e grandeur, les divergences deviennent très-grandes, et plus loin elles sont énormes. Il en est tout autrement des nombres calculés d'après l'autre hypothèse, comme on peut s'en assurer en comparant les deux dernières colonnes. La conclusion que nous devons légitimement tirer de cette remarque, c'est que la couche stellaire non-seulement semble posséder, mais possède réellement une densité plus considérable dans la Voie lactée que dans le reste du ciel.

Notre Soleil n'est pas placé au milieu de la couche qui constitue la Voie lactée; sa position est même très-excentrique. D'abord, la Voie lactée ne traçant pas un grand cercle sur la sphère céleste, il en résulte que nous nous trouvons à une certaine distance, 4 degrés environ, du plan moyen qui la contient. Outre cela, la projection du Soleil sur ce plan moyen est loin d'occuper le milieu de la Voie lactée ; de là vient que, dans le Sagittaire et dans l'Aigle, la densité appa-

rente de la couche stellaire est beaucoup plus considérable qu'à l'autre extrémité du même diamètre. Du côté du Sagittaire, la Voie lactée est absolument insondable, le fond du ciel est formé par une véritable poussière stellaire, et, dans le champ des plus puissants instruments, cette poussière reste projetée sur un fond blanc. Ce fond blanc peut être en partie composé de matière nébulaire; mais, comme cette matière possède nécessairement un certain pouvoir absorbant, elle doit à coup sûr arrêter beaucoup de rayons lumineux, et nous empêcher de voir un grand nombre d'étoiles plus éloignées.

Il faut conclure de toutes ces considérations que la profondeur des cieux est réellement insondable, et que nous n'en connaîtrons jamais les bornes. Il est probable que la réunion des grandes étoiles qui environnent notre Soleil n'est qu'un des amas qui forment la Voie lactée, et que, vu d'une certaine distance, cet amas nous apparaîtrait comme une tache plus blanche dans la Voie lactée elle-même.

En arrivant à cette limite, nous sentons notre imagination confondue. En vain chercherions-nous à accumuler comparaison sur comparaison pour donner une idée de cette immensité. Nous pouvons entasser les chiffres, multiplier les zéros, et, pour abréger, exprimer ces distances par des nombres affectés d'exposants; l'abîme n'en reste pas moins impénétrable. Que dire de ces espaces immenses et des astres qui les remplissent? Que penser de ces étoiles qui sont, sans doute, comme notre Soleil, des centres de lumière, de chaleur et d'activité, destinés, comme lui, à entretenir la vie d'une foule de créatures de toute espèce? Pour nous, il nous semblerait absurde de regarder ces vastes régions comme des déserts inhabités; elles doivent être peuplées d'êtres intelligents et raisonnables, capables de connaître, d'honorer et d'aimer

leur Créateur; et peut-être que ces habitants des astres sont plus fidèles que nous aux devoirs que leur impose la reconnaissance envers Celui qui les a tirés du néant : nous voulons espérer qu'il n'y a point parmi eux de ces êtres infortunés qui mettent leur orgueil à nier l'existence et l'intelligence de Celui à qui ils doivent eux-mêmes et leur existence et la faculté de connaître tant de merveilles.

CONCLUSION.

Le long chemin que nous avons parcouru touche à son terme. En étudiant les phénomènes que nous présente le Soleil, nous avons reconnu la constitution physique de cet astre radieux et la nature chimique des substances qui le composent; nous avons même reconnu des traces de son mode de formation; nous avons pu jusqu'à un certain point entrevoir la place qu'il occupe dans l'univers.

Ce globe enflammé, source de la vie et cause du mouvement sur les planètes, a été jadis une masse nébuleuse semblable à celles que nous voyons dans la profondeur du ciel.

Cette masse, en se refroidissant, a donné naissance aux planètes et à leurs satellites. Elle conserve encore dans son sein une partie de la chaleur qui a dû résulter de sa condensation et de la chute de ses différentes particules, qui, venant des limites les plus reculées de son domaine, ont obéi à l'attraction en tombant vers le centre.

Cette masse énorme, subissant les phases de refroidissement par lesquelles ont passé les planètes qui l'environnent, pourra un jour se trouver complétement dépouillée de l'éclat dont elle brille aujourd'hui; mais il s'écoulera encore des millions et des millions d'années avant qu'elle devienne incapable d'agir efficacement pour entretenir la force et la vie

autour d'elle. Y aura-t-il une cause quelconque dont l'action doive alors rétablir les choses dans leur état primitif? Nous ne saurions le dire. Le monde n'a pas toujours existé, et rien ne nous prouve qu'il doive exister toujours.

Nous avons trouvé que la constitution du Soleil doit être en grande partie gazeuse. Ceci nous explique les phénomènes que nous observons à sa surface. La partie qui reste extérieurement exposée à la radiation vers les espaces célestes est continuellement renouvelée par une circulation intérieure très-compliquée Cette couche est le siége de vastes opérations chimiques, physiques et mécaniques. Des éruptions rejettent de l'intérieur à l'extérieur des masses énormes de gaz métalliques et donnent ainsi naissance aux taches. Ces masses vaporeuses, plus obscures et plus absorbantes, nous interceptent la plus grande partie des rayons lumineux qui émanent de la photosphère gazeuse et complétement dissociée.

Au-dessus de la couche lumineuse qui constitue la limite apparente de l'astre se répand l'atmosphère formée de vapeurs transparentes qui s'élèvent, selon leurs poids spécifiques, à différentes hauteurs. De toutes ces substances, l'hydrogène est une des moins denses; aussi flotte-t-il à une grande hauteur, formant des colonnes et des nuages qui constituent les protubérances roses observées autour du Soleil pendant les éclipses. Parmi les matières qui forment les taches, le sodium, le magnésium, le fer et le calcium sont les plus abondantes entre celles qui sont éruptives.

Cette atmosphère du Soleil, ordinairement invisible, excepté dans les éclipses, est très-vaste; elle s'étend à une distance qui est bien supérieure au rayon solaire; elle a une forme comprimée, son élévation étant moins grande aux pôles qu'à l'équateur. Dans les régions équatoriales, et surtout dans celles où se présentent les taches, on observe une

activité plus grande qu'aux pôles, activité qui se manifeste par un éclat plus grand, et par une hauteur plus considérable de la couche atmosphérique elle-même.

Le spectroscope, en nous révélant la composition chimique du Soleil, nous a montré que les substances dont il est formé sont identiques avec celles qui constituent les corps terrestres, qui sont non-seulement propres à notre système, mais aussi aux autres systèmes stellaires. Mais nous sommes encore bien loin de connaître la nature de toutes ces substances.

Telles sont, résumées dans un aperçu général, les connaissances que nous possédons sur l'astre du jour. Ces connaissances sont bien incomplètes, il est vrai; cependant, si nous considérons la rapidité avec laquelle les découvertes se sont succédé, nous serons fiers d'appartenir à une génération qui, à elle seule, a plus avancé dans cette voie que toutes celles qui l'ont précédée. Le dernier mot n'est pas dit, mais on peut bien espérer que les découvertes à venir, loin de détruire aucune des parties de l'œuvre actuellement accomplie, continueront le travail déjà commencé, le compléteront et résoudront les nombreux problèmes dont nous avons indiqué l'énoncé dans cet Ouvrage. Le travail patient de l'observation, les expériences habilement dirigées pour contrôler les théories et les hypothèses finiront par éclaircir ce qui est encore douteux ou incertain.

Il nous reste beaucoup de choses à apprendre, car la nature est inépuisable dans ses merveilles; lorsque l'on croit arriver au terme, on n'est encore qu'au début, et l'histoire même du Soleil nous fournit une preuve frappante de cette vérité.

Le champ serait bien plus vaste et plus inépuisable si nous voulions nous occuper des influences merveilleuses que cet astre bienfaisant exerce sur la Terre, puisque ses rayons,

doués du pouvoir d'éclairer, d'échauffer et d'agir sur les molécules des corps, sont la cause première d'où découlent, sur toutes les planètes, et la force et la vie. Lorsqu'on se borne à considérer le Soleil comme le centre géométrique des orbites que décrivent les planètes, on se fait une bien pauvre idée de l'action qu'il exerce dans le monde et de son importance dans la création. Mais, lorsque l'on considère son influence physique, chimique et physiologique, on se trouve en présence d'une foule de questions mystérieuses et de problèmes non résolus, dont l'étude suffira, sans doute, à exercer l'activité de bien des générations. Les forces qu'il met en jeu sont d'un ordre plus élevé que l'attraction elle-même, et leur nature intime est tout aussi inconnue que celle de la gravitation. Nous n'avons pas pu entrer dans l'étude spéciale de ces relations, mais nous ne devions pas les laisser complétement de côté. La nature de cet Ouvrage nous a permis à peine d'en dire quelques mots; peut-être un jour pourrons-nous traiter ces questions d'une manière plus sérieuse et plus approfondie.

FIN DE LA SECONDE ET DERNIÈRE PARTIE.

1496 Paris — Imprimerie de GAUTHIER-VILLARS, quai des Augustins, 55

CA ET

UNI Y

TOASTS.

The King.

Alma Mater.

Our Guests.

The Graduating Classes.

UNIVERSITY OF TORONTO ALUMNI ASSOCIATION.